

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Uusiutuvien energiamuotojen kehitys meriliikenteessä

The development of renewable forms of energy in
maritime transport

Työn tarkastaja: Kari Myöhänen

Työn ohjaaja: Kari Myöhänen

Lappeenranta 22.4.2020

Eetu Kuokkanen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Eetu Kuokkanen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Kari Myöhänen

Kandidaatintyö 2020

42 sivua, 9 taulukkoa ja 5 kuvaa

Hakusanat: meriliikenne, energiantuotanto, uusiutuva, energia, polttoaine, laiva

Meriliikenteellä on suuri merkitys kehittyvässä ja globalisoituvassa maailmassamme, sillä se on todistetusti tehokas ja edullinen rahdinkuljetusmuoto. Energiatehokkuudella on vahva vaikutus meriliikenteen toimivuuteen ja taloudellisuuteen laivojen suuren energiantarpeen takia. Raakaöljyn hinnan vaihtelevuus ja kansainvälinen paine kasvihuonekaasujen vähentämiseksi kasvattavat mielenkiintoa uusiutuvia energiamuotoja kohtaan meriteollisuudessa. Tässä työssä tarkastellaan meriliikenteelle soveltuvien uusiutuvien energiamuotojen kehitysasteita ja käytännöllisyyttä.

Työssä käsiteltäviä energiamuotoja vertaillaan teoreettisten skenaarioiden avulla, jotka pohjautuvat kaupallisessa käytössä oleviin aluksiin ja niiden mahdollisiin suorituskykyvaatimuksiin. Vertailussa keskitytään sovellettavien energianlähteiden fysikaalisiin ominaisuuksiin, sekä niiden käytöstä aiheutuviin kustannuksiin. Energiamuotojen käytännöllisyyteen vaikuttavien ominaisuuksien lisäksi vertailu ulottuu myös energiamuotojen käytöstä syntyviin päästöihin.

Vertailussa käytettävien sovellusten perusteella tietyt uusiutuvat energiamuodot ovat kehitysasteensa puolesta jo joko osittain tai kokonaan adoptoitavissa laivan energianlähteeksi, kun taas jotkin tarkastellut energiamuodot eivät toistaiseksi sovellu laivaliikenteen käytettäväksi. Uusiutuvien energiamuotojen käyttöönottoa hillitsevät niiden vaatimien investointien ja käytön korkea hinta, sekä fossiilisten laivapolttoaineiden vakiintunut valta-asema meriliikenneinfrastruktuurissa.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
1.1 Vertailtavuusmäärittäminen.....	6
1.1.1 M/S Oasis of the Seas	7
1.1.2 MSC Oscar	9
1.2 Vertailun rajaukset	10
2 Laajassa käytössä olevat energiamuodot	12
2.1 Uusiutumattomat energiamuodot	12
2.1.1 Polttoöljy ja diesel.....	12
2.1.2 Maakaasu	13
2.1.3 Ydinvoima.....	15
2.2 Uusiutuvat energiamuodot	15
2.2.1 Tuuli	16
3 Kehitteillä olevat uusiutuvat energiamuodot	18
3.1 Uusiutuvat polttoaineet.....	18
3.1.1 Uusiutuva diesel ja biodiesel.....	18
3.1.2 Biokaasu.....	19
3.1.3 Metanoli	22
3.1.4 Vety.....	23
3.2 Sähkö.....	27
3.2.1 Varastoidun sähkön käyttö.....	27
3.2.2 Laivalla tuotetun uusiutuvan sähkön käyttö.....	28
4 Energiamuotojen vertailu	30
4.1 Tekniset ominaisuudet.....	30
4.2 Päästöt	36
4.3 Saatavuus.....	39
5 Yhteenveto	41
Lähdeluettelo	43

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

E	energia	[J, Wh]
LHV	alempi lämpöarvo	[MJ/kg]
P	teho	[W]
q_m	massavirta	[kg/s]

Kreikkalaiset aakkoset

Φ	lämpöteho	[W]
--------	-----------	-----

Dimensiottomat

η	hyötysuhde
--------	------------

Alaindeksit

m	moottori(t)
pa	polttoaine

Lyhenteet

FAME	Fatty Acid Methyl Ester, rasvahappometyyliesteri
HFO	Heavy Fuel Oil
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil, vetykäsitelty kasviöljy
LNG	Liquified Natural Gas, nesteytetty maakaasu
MDO	Marine Distillate Oil
MGO	Marine Gas Oil
PEFC	Polymer Electrolyte Fuel Cell

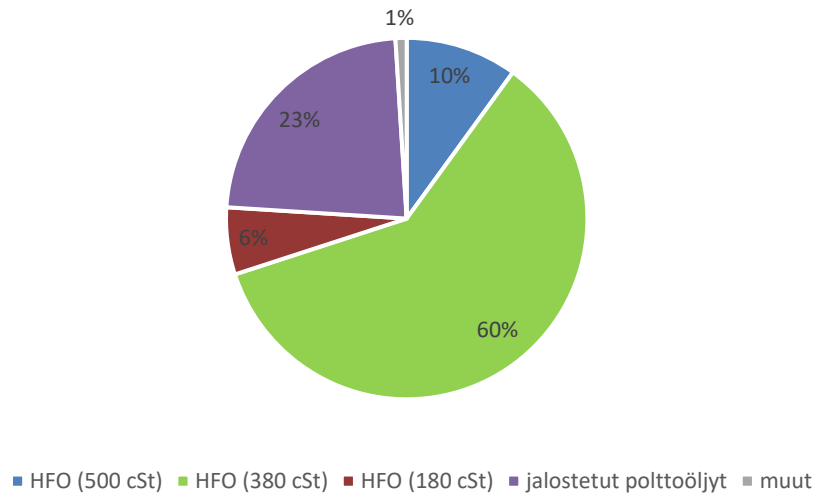
1 JOHDANTO

Meriliikenteellä on suuri ja ennestään kasvava merkitys alati kehittyvässä ja globalisoituvassa maailmassamme. Laivat voivat kuljettaa suuria määriä rahtia kustannustehokkaasti pitkiä matkoja ja risteilyt ovat suosittu vapaa-ajanviettotapa.

Energiantuotannolla ja energiatehokkuudella on valtava vaikutus meriliikenteen kannattavuuteen ja toimivuuteen. Jotkin laivat kuluttavat jopa 30 prosenttia liikaa polttoainetta epätäydellisen suunnittelun ja huoltojen laiminlyömisensä takia (Fridell, Winnes et al. 2013). Lisäksi raakaöljyn hinnan suuri vaihtelevuus vaikuttaa öljypohjaisilla polttoaineilla toimivien laivojen käyttökustannuksiin. Laivat ovat kelluvia voimalaitoksia, jotka tuottavat liikkumiseen vaadittavan mekaanisen energian lisäksi myös sähköä ja lämpöä laivan järjestelmien ylläpitoon ja tilojen lämmittämiseen. Meriliikennettä kritisoidaan sen tuottamien ilmastopäästöjen vuoksi, joten laivojen energiantuotanto on kehittymässä kohti uusiutuvan energian tuotantoa.

Laivaliikenne tuottaa tällä hetkellä 3 prosenttia ihmiskunnan hiilidioksidipäästöistä ja osuuden odotetaan kasvavan tulevaisuudessa (Fridell, Winnes et al. 2013). Vuonna 2018 Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) sitoutui pyrkimään vähentämään meriliikenteen tuottamia kasvihuonekaasuja puoleen ja hiilidioksidipäästöjä 30 prosenttiin vuoden 2008 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Koska maailman laivaliikenteen ei uskota vähenevän lähitulevaisuudessa merkittävästi on uusiutuvilla energianlähteissä hyvin keskeinen merkitys asetetun tavoitteen saavuttamisessa, vaikka laivaliikenne onkin jo ympäristön kannalta puhtain ja energiatehokkain rahdin kuljetusmuoto kuljetettuun rahtimäärään suhteutettuna. (IMO 2020)

Kuva 1.1. on kaavio, johon on listattu laivapolttoaineiden osuus Singaporen sataman polttoainemyynnistä vuonna 2009 (McGill, Remley et al. 2013). Polttoainetyypit on jaoteltu kaaviossa kolmen eri viskositeetin HFO-laatuihin (raskas polttoöljy), jalostettuihin polttoöljyihin (MDO, MGO, diesel) ja muihin polttoaineisiin.



Kuva 1.1. Singaporen satamassa vuonna 2009 myytyjen polttoainetyyppien jakauma (McGill, Remley et al. 2013)

Kuvan 1.1 perusteella laivaliikenteen polttoaineenkulutus koostui vuonna 2009 hyvin keskeisesti raskaasta polttoöljystä, etenkin sen 380 cSt viskositeetin omaavasta laadusta.

1.1 Vertailtavuusmäärittäminen

Työssä tarkasteltavia uusiutuvia energiamuotoja sovelletaan kahteen laivaan, jotka ovat:

1. M/S Oasis of the Seas (risteilyalus)
2. MSC Oscar (konttialus)

Vertailuun käytettävät laivat ovat kaupallisessa käytössä, joten niiden oletetaan käyttävän edullisinta moottorivalmistajan hyväksymää polttoainetyyppiä, eli luultavimmin raskasta ylijäämäpolttoöljyä. Vain yhden polttoainetyypin käyttäminen vertailussa on siis perusteltua koko kaupallista meriliikennettä edustavaa tarkastelua tehdessä.

Energiamuotojen vertailu perustuu hyvin pitkälti oletuksiin, sillä täysin uusiutuvalla energialla toimivat laivat ovat vielä melko hypoteettisella tasolla, eikä käytännön sovellutuksia juuri ole. Mikäli sovelluksia tai tutkimuksia tarkasteltavan energiamuodon käytöstä ei löydy meriteollisuudesta, sille etsitään mahdollisimman sovellettavissa oleva

esimerkki muilta teollisuuden aloilta, kuten voimalaitossähkön tuotannosta. Vertailussa on myös tarkasteltavien energiamuotojen käytöstä aiheutuvat päästöt.

Vertailussa käytetään toistuvasti energiamäärämuunnosta $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$.

1.1.1 M/S Oasis of the Seas

360 metriä pitkä ja 65 metriä leveä M/S Oasis of the Seas on yhdysvaltalaisen Royal Caribbean Internationalin operoima risteilyalus. Aluksen bruttovetoisuus on noin 225 000. Bruttovetoisuus on yksikötön, laivan tilavuutta kuvaava luku. Oasis of the Seas on varustettu kuudella moottorilla, joiden yhteenlaskettu teho on 97 020 kW ja joiden tuottama huippunopeus on 20,2 solmua. (Wärtsilä 2009)

Aluksen kuudesta moottorista kolme ovat Wärtsilä 12V46-mallisia 12 sylinterisiä dieselmootoreita, joiden yksikköteho on 13 860 kW ja kolme Wärtsilä 16V46-mallisia 16 sylinterisiä dieselmootoreita, joiden yksikköteho on 18 480 kW. (Wärtsilä 2009)

Koska Oasis of the Seas on kaupallisessa käytössä, sen oletetaan käyttävän polttoaineenaan raskasta polttoöljyä (HFO), sillä se on muita diesellaatuja edullisempaa. 12V46DF-moottorin polttoainenkulutus raskaalla polttoöljyllä täydellä teholla vakionopeudella on 186,3 g/kWh. 16V46DF-moottorilla vastaava kulutus on myös 186,3 g/kWh (Wärtsilä 2019). Jos kaikkia laivan moottoreita käytetään yksi tunti täydellä teholla ne tuottavat bruttona 97 020 kWh energiaa. Tällöin raskasta polttoöljyä kuluu noin 18 075 kg.

Taulukon 1 mukaisesti IFO 180-laatuisen raskaan polttoöljyn lämpöarvo on 40,48 MJ/kg, joten 18 075 kg dieseliä sisältää yhteensä 731 669 MJ energiaa, joka on noin 203 241 kWh (McAllister, Chen et al. 2011). Tämän energian luovuttamiseen tunnissa tarvitaan siis 203 241 kW polttoainetehto. Kun tiedetään moottorien tuottama teho ja niiden käyttämä polttoainetehto, voidaan niiden täyden kuorman hyötysuhde laskea yhtälöllä

$$\eta_m = \frac{P_m}{\Phi_{pa}} \quad (1)$$

jossa	η_m	moottorin hyötysuhde [-]
	P_m	moottoreiden teho [W]
	Φ_{pa}	polttoaineen lämpöteho [W].

Yhtälöön 1 sijoitettuna M/S Oasis of the Seas:in teholutumat määrittävät sen moottoreiden keskiarvolliseksi maksimikuormahyötysuhteeksi:

$$\eta_m = \frac{97020 \text{ kW}}{203241 \text{ kW}} \approx 0,48 \text{ (48 \%)}$$

M/S Oasis of the Seas kykenee täydellä teholla kulkemaan 20,2 solmun nopeudella eli 20,2 merimailia tunnissa. Koska merimaili on 1,852 kilometriä, kykenee alus kulkemaan tunnissa 37,4 km (Finlex 2014).

Royal Caribbean ei ole virallisesti julkistanut sitä polttoainemäärää, joka alukselta vaaditaan risteilymatkan suorittamiseen. Vaadittua polttoainemäärä voidaan arvioida laivan tekemän risteilyn pituuden ja moottorien käyttämän polttoainemäärän avulla. M/S Jewel of the Seas, 16 yön risteilyllään Galvestonista (Texas, Yhdysvallat) Atlantin valtameren yli Barcelonaan (Espanja) matkaa risteilyaikataulun mukaan 232 tuntia eli noin 9,7 vuorokautta pysähtymättä missään satamassa (Royal Caribbean 2020). Mikäli Oasis of the Seas:iltä vaaditaan kykyä suorittaa vastaavanlainen matka, on sille asetettava tiettyjä vähittäisvaatimuksia.

Oasis of the Seas:in huipputehokulutuksella, eli täydellä moottoriteholla ajettaessa 232 tunnin yhtäjaksoisen matkan kulkemiseen kulutettavan polttoaineen massa on vähintään 4 193 360 kg. Koska polttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä, jonka lämpöarvo on 40,48 MJ/kg, saadaan matkaan kulutettavan polttoaineen energiasisällöksi 169 747 GJ. Taulukosta 1 saadaan raskaan polttoöljyn (IFO 180) tiheydeksi 995,1 kg/m³. Kyseisellä tiheydellä kulutettavan polttoaineen tilavuus, ja samalla laivan polttoainetankin minimi-tilavuus on 4 214 m³.

Oasis of the Seas:in huippunopeudella kuljettaessa 232 tunnin matka on pituudeltaan 8679 km.

Täydellä teholla toimivat moottorit tuottavat tunnissa 97 020 kWh bruttoenergiamäärän, joten 232 tunnin risteilyn aikana moottoreilta saatava kokonaisenergiamäärä on 22 508 640 kWh eli 81 031 106 MJ. Matkan aikana moottoreilta saadun kokonaisenergiamäärän ja kulutetun polttoaineen energiasisällön suhde on yhtälöllä 1 laskettu hyötysuhde.

IFO 180-laatuisen raskaan polttoöljyn hinta 4.4.2020 Rotterdamin satamassa oli 175 dollaria tonnia kohden (Bunkerex 2020). Kyseisellä hinnalla 232 tunnin matkaan kulutetun polttoaineen hankintakustannus on 733 838 dollaria.

Polttoaineenkulutuksen ja kuljetun matkan laskennassa ei otettu huomioon Jewel of the Seas:in ja Oasis of the Seas:in rakenteellisia eroja.

1.1.2 MSC Oscar

MSC Oscar on Mediterranean Shipping Companyn (MSC) operoima 395 metrinen konttialus, jonka bruttovetoisuus on 193 000. MSC Oscar kuljettaa rahtia Aasian ja Pohjois-Euroopan välillä ja kykenee kuljettamaan kerralla jopa 19 224 yksittäistä 20 jalan (6,1 m) ISO-konttia. (MSC)

Laivan päämoottorina toimii yksi MAN B&W 11S90ME-C dieselmoottori, joka tuottaa 62,5 MW huipputehon. Laivan normaalikäytöllä moottoria käytetään 56,25 MW teholla ja tavallinen matkanopeus on 22,8 solmua, eli 42,2 km/h. Laivan päämoottori kuluttaa normaalikäytöllä noin 222 500 kg polttoainetta päivässä. MSC Oscar kykenee matkaamaan yhtäjaksoisesti 26 300 merimailia eli 48 708 km. (MSC)

Mikäli MSC:n ilmoittama 26 300 merimailin matka voidaan suorittaa yhtäjaksoisella 22,8 solmun nopeudella polttoaineen 222 500 kilogramman päiväkulutuksella laivan päämoottorin tuottaessa 56,25 MW tehon, niin kyseinen matka kestää 48 vuorokautta ja 91 minuuttia. Tällöin polttoainetta kuluu MSC:n ilmoittamalla päiväkulutuksella 10 693,99 tonnia. MSC Oscar:in oletetaan käyttävän polttoaineenaan raskasta polttoöljyä (HFO) kulujen minimoimiseksi. Taulukon 1 mukaisella raskaan polttoöljyn (IFO 180) tiheydellä saadun polttoaineen kokonaismäärän tilavuus on 10 747 m³.

Matkaan kulutetun lähes 10 700 polttoainetonnin hinta on 175 dollarin tonnihinnalla 1 871 448,25 dollaria.

48 vuorokauden ja 90 minuuttia eli noin 1154 tunnin matkan aikana laivan normaalikäytöllä oleva päämoottori tuottaa 64,92 GWh energiamäärän. Taulukon 1 mukainen HFO:n (IFO 180) lämpöarvo on 40,48 MJ/kg, joten matkaan kulutetun polttoaineen sisältämä kokonaisenergiamäärä on 120,32 GWh. Laivan päämoottorin hyötysuhde saadaan energiamäärien avulla yhtälöllä 2:

$$\eta_m = \frac{E_m}{E_{pa}} \quad (2)$$

jossa	η_m	moottorin hyötysuhde [-]
	E_m	moottorin tuottama energia [Wh]
	E_{pa}	polttoaineen luovuttama lämpöenergia [Wh].

Yhtälöön 2 sijoitettuna MSC Oscarin hyötysuhteeksi saadaan ilmoitettujen lukuarvojen pohjalta:

$$\eta_m = \frac{64,92 \text{ GWh}}{120,32 \text{ GWh}} \approx 0,54 \text{ (54\%)}$$

MSC Oscar:lle yhtälöllä 2 laskettu hyötysuhde (54 %) on epäluonnollisen korkea dieselmoottorille. Hyötysuhteen laskemisessa käytettiin vain MSC:n ilmoittamaa päivittäistä polttoaineenkulutusta (222 500 kg/vuorokausi) ja sitä oletusta, että kyseinen polttoaineenkulutus saavutetaan moottoreiden toimiessa vuorokauden yhtäjaksoisesti 56,25 MW normaaliteholla käyttäen polttoaineenaan HFO:ta. Mikäli päivittäinen polttoaineenkulutus on laskettu tai mitattu polttoaineella, jolla on suurempi lämpöarvo, kuin HFO:lla, on todellinen hyötysuhde laskettua pienempi.

1.2 Vertailun rajaukset

Kappaleessa 3 tarkasteltavia uusiutuvia energiamuotoja sovelletaan 232 tunnin risteilyyn ja 1154 tunnin rahdinkuljetusmatkan tapauksiin vain käytetyn energiamuodon matkaan vaadittavan määrän ja tilavuuden, sekä matkaan käytetyn energiamäärän hinnan

perusteella. Uusiutuvan energiamuodon käyttöönoton vaativia investointeja ja laitteistoja tarkastellaan vähäisesti tai ei lainkaan. Eri energianlähteiden käyttöön liittyviä säädöksiä tai lainsäädännöllisiä vaatimuksia ei oteta huomioon. Kappaleessa 3 käsitellään vain ne uusiutuvat energiamuodot, jotka soveltuvat hyvin laivaliikenteen energianlähteiksi jo tällä hetkellä tai lähitulevaisuudessa. Kustannuslaskelmissa käytetään valuuttana vain Yhdysvaltain dollaria ja 2000-luvun hintoja, eikä niissä oteta huomioon inflaation vaikutusta rahan arvoon.

Tässä työssä käsitellään tilanteita, joissa laivan energiajärjestelmä korvataan kokonaisuudessaan uusiutuvilla energiamuodoilla, joten fossiilisen ja uusiutuvan energian yhdistelmäjärjestelmiä ei oteta huomioon. Työssä käsitellään vain suuria laivoja, sillä niissä energianlähteen valinnalla on suurin merkitys.

Polttoainekustannusten tarkasteluissa huomioidaan vain polttoaineen markkinahinnan avulla laskettu hankintahinta, eikä polttoaineen kuljettamisen, tankkaamisen, käsittelyn tai säilyttämisen kustannuksia lisätä polttoainekustannuslaskuihin.

2 LAAJASSA KÄYTÖSSÄ OLEVAT ENERGIAMUODOT

Tässä kappaleessa käsitellään laivaliikenteen energiantuotannon nykytilannetta.

2.1 Uusiutumattomat energiamuodot

Nykypäivän raskas laivaliikenne toimii lähes täysin uusiutumattomilla polttoaineilla. Kaupallinen liikenne toimii pääosin raskaalla ylijäämäpolttoöljyllä ja öljynjalosteilla. Jotkin sota-alukset ja jäänmurtaajat toimivat myös ydinvoimalla.

2.1.1 Polttoöljy ja diesel

Raskas polttoöljy (HFO, Heavy Fuel Oil) on nykypäivän käytetyin polttoaine raskaassa laivaliikenteessä sen halvan hinnan ja hyvän saatavuuden ansiosta. Raskas polttoöljy on öljynjalostuksessa syntyvää ylijäämää, jonka jalostusaste ei ole yhtä korkea kuin dieselillä tai polttoöljyllä. Raskas polttoöljy on viskoosia ja tiheää (tiheys yli 900 kg/m^3). Korkean viskositeetin vuoksi raskasta ylijäämäpolttoöljyä täytyy lämmittää, jotta se pysyy tarpeeksi juoksevana. Ajossa lämmittämiseen käytetään pakokaasun hukkalämpöä, mutta satamassa ollessaan laiva käyttää polttoainekäyttöisiä lämmittimiä polttoöljyn lämmitykseen. Tämä laskee laivan kokonaishyötysuhdetta. (IMO 2009)

Raskaan polttoöljyn korkeaan rikkipitoisuuteen on kiinnitetty huomiota ja laivapolttoaineen suurin sallittu rikkipitoisuus laskettiin 1.1.2020 aiemmasta 3,5 prosentista 0,5 prosenttiin IMO 2020-säännön nojalla (Fridell, Winnes et al. 2013). Rikkipitoisuussäädösten lisäksi MARPOL liite 1 säädös 43 kieltää raskaan polttoöljyn käytön eteläisellä napa-alueella. Pohjoista napa-aluetta koskeva kieltäminen on kehitteillä. (IMO 2018)

Kevyt polttoöljy on puhtaampi, mutta kalliimpi vaihtoehto raskaalle polttoöljylle. Laivaliikenteessä käytetty öljynjalosteseos (MDO, Marine Diesel Oil) koostuu usein erilaisista nestemäisistä hiilivedyistä, kuten dieselistä, teollisuuden käyttöön

valmistetusta polttoöljystä ja raskaasta polttoöljystä. MDO vastaa se usein ominaisuuksiltaan läheisesti dieseliä, vaikka se on öljynjalosteiden seos, jota valmistetaan eri jalostepitoisuuksilla eri käyttökohteisiin. Toinen yleinen laivaliikennekäytössä oleva jalostetyyppi on kevyt laivapolttoöljy (MGO, Marine Gas Oil), joka on ominaisuuksiltaan kuin MDO, mutta suuremman jalostusasteensa vuoksi puhtaampaa ja kalliimpaa. (Corbett, Winebrake 2008)

Taulukossa 1 vertaillaan laivapolttoaineena käytettyjen polttoaineiden keskiarvollisia ominaisuuksia vuodelta 2008. IFO 180 on eräs raskaan ylijäämäpolttoöljyn laatu, DMB on MDO-laatu ja DMA on MGO-laatu.

Taulukko 1. Polttoainelaatujen keskiarvollisia ominaisuuksia (Corbett, Winebrake 2008)

	IFO 180 (HFO)	DMB (MDO)	DMA (MGO)
lämpöarvo [MJ/kg]	40,48	41,85	41,98
tiheys [kg/m ³]	995,1	884,5	873,1
rikkipitoisuus [m-%]	2,4	0,55	0,35

4.4.2020 Rotterdamin polttoainehinnoilla IFO 180-laatuksen HFO:n hinta oli 175 dollaria tonnilta ja MGO:n hinta 300,25 dollaria tonnilta (Bunkerex 2020). Hinnoista päätellen polttoaineen jalostusaste nostaa polttoaineen hintaa huomattavasti. Huomioitavaa mainitussa hinnassa on se, että 4.4.2020 raakaöljyn hinta oli epätavallisen alhainen.

2.1.2 Maakaasu

Laivaliikenteen suurten rikkipäästöjen vähentämistä vaativat säädökset ovat jo nostaneet nesteytetyn maakaasun käyttöä meriliikenteessä. Maakaasu on kevyiden hiilivetykaasujen seos, josta suurin osa (noin 95 %) on metaania. Vaikka nesteytetty maakaasu (LNG, Liquefied Natural Gas) on ympäristön kannalta huomattavasti polttoöljyä puhtaampi ja ”tavallisella” raakaöljyn hinnalla jopa hieman halvempi vaihtoehto, maakaasukäyttöisten laivojen määrä on edelleen melko vaatimattomalla

tasolla. Vuonna 2013 LNG-käyttöisten alusten osuus kaupallisista aluksista oli alle 1 %. Nesteytetyn maakaasun käyttöönottoa jarruttavat muun muassa sen polttoöljyä huonompi saatavuus, turvallisuusmääräykset ja ennen kaikkea suuret investointikulut. (Adamchak, Adede 2013) Nesteytetyn maakaasun käyttöönotto polttoöljyllä toimivassa laivassa vähentäisi lähes kaikkia kyseisen laivan päästöjä lukuun ottomatta metaania (CH₄), jota voi pahimmillaan päätyä maakaasun käytössä hieman myös savukaasujen joukkoon. Metaani on hyvin voimakas kasvihuonekaasu, joka savukaasuihin päätyessään pienentää jonkin verran maakaasukäytön adoptoimisen ilmastohyötyjä. Hyvin toimivan LNG-moottorin metaanipäästöt ovat kuitenkin pienet. (IMO 2009)

Eräs suurimmista haasteista maakaasun käytössä on sen pieni tiheys. Jotta maakaasua voidaan varastoida alukseen riittävä määrä, tarvitsee sen tiheyttä nostaa huomattavasti. Normaalisissa ilmanpaineissa (1 atm) maakaasu muuttuu nesteeksi -162 °C lämpötilassa (Van Tassel 2013). Jäähtyessään nesteeksi maakaasun tiheys kasvaa 600-kertaiseksi ja saavuttaa arvon 440 kg/m³, jolloin sitä voidaan varastoida alukseen matkaan tarvittava määrä. Nesteytetyn maakaasun säilytykseen tarkoitetun säiliön tulee olla hyvin lämpöeristetty ja paineenkestävä. (Stojcevski 2014)

Maakaasun lämpöarvo on noin 50 MJ/kg ja maakaasua hyödynnetään laivoissa dieselin ja kaasun yhteispoltolla, polttomoottorikäytöllä tai kaasuturbiinilla (Elgohary, Seddiek 2012). Nesteytetyn maakaasun energiatiheys on noin 22 GJ/m³, kun vastaava luku on raskaalla polttoöljyllä (HFO) 40 GJ/m³. Tämä tarkoittaa sitä, että tietyn nettoenergiamäärän varastoimiseen nesteytettyä maakaasua polttoaineenaan käyttävä laiva tarvitsee polttoaineen säilytykseen minimissään lähes kaksinkertaisen tilan samalla hyötysuhteella toimivaan diesellaivaan verrattuna.

Tammikuussa 2020 nesteytetyn maakaasun hinta Japanissa oli noin 6 USD/MMBtu (METI 2020). Koska 1 MMBtu on 1055 MJ ja maakaasun lämpöarvo on 50 MJ/kg, niin kyseisellä hinnalla LNG:n tonnihinnaksi muodostuu 284,36 dollaria tonnilta (Suomen Standardisoimisliitto SFS ry 2001).

Wärtsilän DF moottoreita voi käyttää joko polttoöljyllä tai nesteytetyllä maakaasulla ja käytettävää polttoainetta voi vaihtaa ilman moottorin rakenteellisia muutoksia.

16V46DF-moottorimallin ilmoitettu nestekaasunkulutus on täydellä teholla 7364,8 kJ/kWh. (Wärtsilä 2019)

Nesteytetyn maakaasun lämpöarvon ollessa 50 MJ/kg polttoaineen massakulutus on 147,3 grammaa moottorin tuottamaa kilowattituntia kohden. 7364,8 kilojoulea on noin 2,046 kWh ja moottorin hyötysuhde maakaasulla käytettäessä saadaan yhtälöllä 2:

$$\eta_m = \frac{E_m}{E_{pa}} = \frac{1 \text{ kWh}}{2,046 \text{ kWh}} = 0,4888 \dots \approx 0,49 \text{ (49 \%)}$$

2.1.3 Ydinvoima

Maailmassa on käytössä yli 160 ydinkäyttöistä vedessä liikkuvaa alusta, joista suurin osa on sukellusveneitä. Ydinvoimaa käytetään meriliikenteessä myös jäänmurtaajissa ja lentotukialuksissa. Ydinvoimalla toimivat alukset voivat kulkea jopa vuosikymmeniä ilman tankkaustarvetta. Lisäksi ydinvoiman tuottamaa sähkövirtaa on helppo hyödyntää laivan varusteissa ja järjestelmissä. Ensimmäinen ydinvoimalla toimivat pinta-alus oli jäänmurtaja Lenin, jossa oli alun perin kolme 90 MW OK-150 reaktoria. Lenin oli käytössä 1959-1989. (World Nuclear Association 2019)

Suuresta tehotiheydestä ja pitkistä tankkaussykleistä huolimatta ydinvoimalle ei ole suurta kysyntää kaupallisessa meriliikenteessä turvallisuus- ja ympäristösäädösten, sekä poliittisten asenteiden takia (IMO 2009).

2.2 Uusiutuvat energiamuodot

Meriliikenteessä on jo käytössä joitain uusiutuvan energian muotoja. Uusiutuvia energianlähteitä käytetään nykypäivän meriliikenteessä laivojen taloudellisuuden parantamiseksi ja käyttöpäästöjen vähentämiseksi.

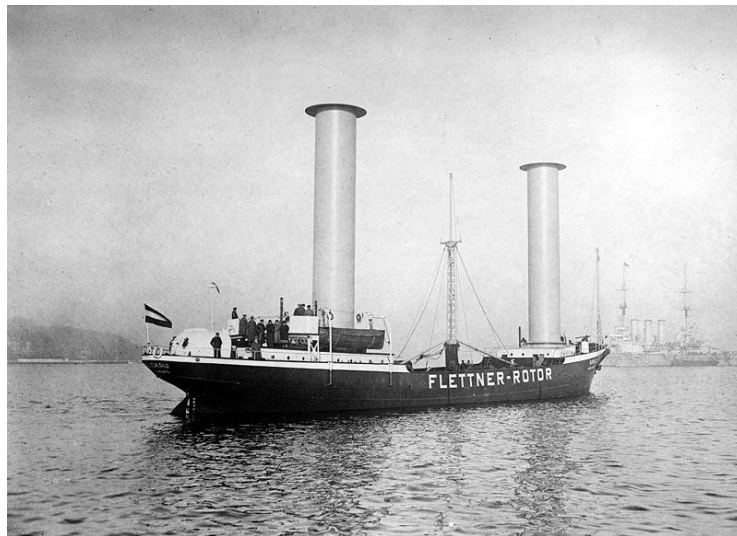
2.2.1 Tuuli

Suurimman osan meriliikenteen historiasta laivan matkasivat täysin tuulen kineettisen energian avulla. Moottorien kehitys syrjäytti tuulienergian hyödyntämisen lähes kokonaan meriteollisuuden ulkopuolelle, mutta nykyaikaisia hyödyntämistapoja on ilmestynyt markkinoille. Suuria laivoja ei nykyisin voida kannattavasti kuljettaa pelkällä tuulen työntövoimalla, mutta sen avulla voidaan vähentää laivojen polttoaineenkulutusta, päästöjä ja käyttökustannuksia käyttämällä tuulienergiaa hyödyntäviä keksintöjä.

Suomalaisen Norsepower-yrityksen kehittämiä roottoripurjeita on tällä hetkellä käytössä muun muassa M/S Viking Grace risteilyaluksessa ja Maersk Pelican rahtilaivassa. Roottoripurjeiden toiminta perustuu Magnus-efektiin, eli putkilomaisen roottoripurjeen yli sivulta kulkevan ilmavirran synnyttämään paine-eroon ja siitä aiheutuvaan työntövoimaan. Yhtiön kehittämä roottoripurje toimii automatisoidusti ja kytkeytyy pois päältä tuulen suunnan ja nopeuden ollessa epäsuotuisia. Roottoripurjeen toimintaperiaatteen oivalsi ensimmäisenä saksalainen insinööri Anton Flettner. Maersk Pelican:iin asennettujen kahden roottoripurjeen odotetaan vähentävän laivan polttoaineenkulutusta valtameriliikenteessä 7-10 prosentilla. (Norsepower 2020)

M/S Viking Graceen asennettu roottoripurje säästää aluksen polttoaineenaan käyttämää nesteytettyä maakaasua parhaimmillaan jopa 300 tonnia vuodessa. Lisäksi se vähentää aluksen hiilidioksidipäästöjä parhaimmillaan 900 tonnilla vuodessa. (Viking Line 2020)

Anton Flettnerin oivallus Magnus-efektin hyödyntämisestä laivoissa roottoripurjeilla ajoittuu 1920-luvulle. Vuonna 1925 koekäytettiin ensimmäistä Flettner-roottoreilla varustettua laivaa, Buckau:a. Laivan koekäytön onnistumisesta huolimatta roottoripurjeiden kaupallinen kehitys pysähtyi ja jatkui vasta 2000-luvulla. Lähes vuosisadan pituinen kehitysseisähdys oli todennäköisesti öljyn vakaan aseman syytä. (De Marco, Mancini et al. 2016)



Kuva 2.1. Buckau, ensimmäinen Flettnerin kehittämällä roottoripurjeella varustettu alus
(Library of Congress 2020)

SkySails-yhtiön kehittämä tuulipurje on leijamainen laivan keulaan köysillä kiinnitettävä tuulen kineettistä energiaa hyödyntävä purje, joka vetää myötätuulessa kulkevaa laivaa eteenpäin. Yhtiön mukaan SkySails C 320 voi suotuisissa tuuliolosuhteissa vähentää laivan päämoottorin tehontarvetta 2 megawatilla 400 m² purjeensa avulla. Yhtiöllä on tuulipurjejärjestelmiä jopa 1000 m² purjeilla. Jos polttoaineena käytetään HFO:ta ja laivan hyötysuhde on 50 %, niin 2 megawatin pienennys moottorin tuottamassa tehossa säästää polttoainetta hieman yli 350 kilogrammaa tunnissa. (SkySails 2020)

3 KEHITTEILLÄ OLEVAT UUSIUTUVAT ENERGIAMUODOT

Kappaleessa 3 perehdytään meriliikenteen kehitteillä tai vähäisellä käytöllä oleviin uusiutuviin energiamuotoihin ja niiden käytännönsidonnaisiin ominaisuuksiin, kuten suorituskykyyn ja kustannuksiin. Energiamuotoja sovelletaan kohdan 1.1 skenaarioihin hyvän vertailtavuuden saavuttamiseksi ja energiaratkaisuiden käytännöllisyyksien hahmottamiseksi.

3.1 Uusiutuvat polttoaineet

3.1.1 Uusiutuva diesel ja biodiesel

Uusiutuvan dieselin tai biodieselin käyttöönotto laivoissa on kenties vaivattomin tapa siirtyä käyttämään uusiutuvia energiajärjestelmiä meriliikenteessä, sillä dieselillä toimivat moottorit toimivat yleensä myös uusiutuvalla dieselillä ja biodieselillä ilman suurempia rakenteellisia muutoksia. Biodieseliä tuotetaan pääosin metanolin reaktioiden avulla kasviöljyistä ja eläinrasvoista. Uusiutuva diesel tuotetaan sen sijaan vetykäsittelmällä kasviöljyjä ja eläinrasvoja. (REG 2019)

Molemmat polttoaineet ovat biopohjaisia, mutta niiden valmistusmenetelmät poikkeavat toisistaan. Dieselmoottoria käytettäessä uusiutuvan dieselin, biodieselin ja fossiilisen dieselin välillä ei ole merkittävää eroa suorituskyvyssä, mutta esimerkiksi biodieselillä saavutetaan suurempi polttoaineenkulutus johtuen sen fossiilista dieseliä matalammasta lämpöarvosta (alle 40 MJ/kg), jota biodieselissä laskee korkea happipitoisuus. Uusiutuvan dieselin lämpöarvo on fossiilisen dieselin tasolla. Uusiutuvan dieselin käytön päästöt ovat hieman pienemmät, kuin fossiilisen dieselin käytön päästöt samalla moottorilla. (Roskilly, Nanda et al. 2008)

WWFC 5-polttoaineluokitus (WorldWide Fuel Charter) ei sisällä perinteisenä biodieselinä pidettyä FAME:a (Fatty Acid Methyl Ester), mutta se sisältää joitain uusiutuvia dieseleitä, kuten Nesteen NExBTL:n, joka on vetykäsiteltyä kasviöljyä (Hydrotreated Vegetable Oil, HVO). Tiukan WWFC 5-luokituksen saaneet polttoaineet ovat dieselmoottorin toiminnan kannalta turvallisia. (Neste 2013)

Biodieselin (tyypillisesti FAME:a) on havaittu aiheuttavan haitallisia reaktioita ollessaan kontaktissa moottoriöljyn kanssa. Lisäksi FAME:n ominaisuuden heikkenevät huomattavasti pakkasella. HVO-tyyppisellä uusiutuvalla dieselillä vastaavia ongelmia ei ole. Laivaliikenteeseen käyttöön otettava biopohjainen diesel on tämän takia todennäköisemmin uusiutuvaa dieseliä. Nesteen uusiutuvan dieselin lämpöarvoksi on ilmoitettu 44,1 MJ/kg. (Neste 2016)

Monet HVO:ta tuottavat yritykset pitävät sen hinnan ja tuotantokustannukset salassa, joten niitä on arvioitava tuotantoon käytettävien raaka-aineiden, laitteiden ja niiden käytön kustannusten avulla. IEA Bioenergy:n raportoima keskiporto tuotantokustannus HVO:lle on 78 €/MWh. Nesteen uusiutuvan dieselin lämpöarvolla (44,1 MJ/kg) tonnihinta-arvio on 955,50 euroa (IEA Bioenergy 2020). Suomen Pankin 15.4.2020 valuuttakurssilla tonnihinta-arvio on 1041,78 dollaria (Suomen Pankki 2020). Arvioitu tonnihinta on vain tuotantokustannus. Vaikka arvio vastaisi todellisuutta, niin HVO:n myyntihinta olisi myynnin voittomarginaalin verran arvioitua korkeampi. Vastaavasti FAME-biodieselin tonnihinta oli 646,8 dollaria 16.4.2020 (Neste 2020).

Jos Oasis of the Seas:in moottoreiden oletetaan toimivan samalla hyötysuhteella HFO:lla ja uusiutuvalla dieselillä, niin polttoaineenkulutus on hieman pienempi uusiutuvalla dieselillä. 232 tunnin risteilyskenaariossa Nesteen uusiutuvaa dieseliä kuluisi näin ollen 3 849 143 kg, joka maksaisi arvioidulla tuotantohinnalla 4 009 960 dollaria. Nesteen uusiutuvan dieselin ilmoitettu minimitiheys on 770 kg/m³, jolla risteilyskenaariossa kulutetun polttoaineen tilavuudeksi saadaan 4 999 m³ (Neste 2016).

MSC Oscar:in maksimimatkan skenaariossa, jossa käytetään samaa Nesteen uusiutuvaa dieseliä kuin risteilyskenaariossa kuluisi polttoainetta 9 816 161 kg. Nesteen uusiutuvan dieselin ilmoitetulla minimitiheydellä polttoainetankin minimi-tilavuus on tällöin 12 748 m³ ja polttoainekustannus on 1014,78 dollarin tonnihinnalla noin 10 226 280 dollaria.

3.1.2 Biokaasu

Biokaasu on biomassasta ja jätteistä valmistettua palavaa kaasua, joka koostuu maakaasun tavoin pääosin metaanista. Biokaasun valmistus tapahtuu pääosin

kaatopaikoilla ja maatalousjätevarastoilla, joihin voidaan asentaa jätteiden mätänemisessä syntyvän kaasun talteenottojärjestelmiä. Jätteitä mädättämällä saatu biokaasu ei sovellu sellaisenaan liikennekäyttöön epäpuhtauksiensa, kuten hiilidioksidin takia. Tämän takia jätebiokaasua on jalostettava ja puhdistettava, jotta se saavuttaa maakaasun ominaisuudet. Jalostus nostaa biokaasun hintaa. Biokaasua, jonka metaanipitoisuus on puhdistamalla nostettu hyvin korkeaksi, kutsutaan biometaaniksi. (Persson, Jönsson et al. 2006a) Vuonna 2016 Euroopassa oli 17 662 biokaasuntuotantolaitosta, joista suurin osa hyödynsi maatalousjätteitä (Deremince, Königsberger 2018).

Liikennekäyttöön tarkoitettu nesteytetty biokaasu (LBG, Liquified BioGas) vastaa ominaisuuksiltaan hyvin läheisesti nesteytettyä maakaasua, joten maakaasulla toimivat alukset voivat käyttää nesteytettyä biokaasua ilman moottorin tai polttoainejärjestelmän muutoksia (Fridell, Winnes et al. 2013). Biokaasua käytetään energiantuotannossa pääosin kipinäsytytteisissä moottoreissa, joten myös dieselmootoreilla varustetut laivat voivat käyttää biokaasua tietyillä muutosinvestoinneilla. Biokaasun adoptoivaan dieselmootoriin tehtäviä muutoksia ovat muun muassa moottorin puristusasteen laskeminen, sytytysjärjestelmän asennus ja polttoaineensyötön muutokset (Wierzbicki 2012).

Kaatopaikkabiokaasun lämpöarvo on sen epäpuhtauksien takia vain noin 12,3 MJ/kg, kun Pohjanmeren maakaasulla vastaava luku on 47 MJ/kg (Persson, Jönsson et al. 2006b). Kalliin puhdistusprosessin jälkeen puhtaan biometaanin (noin 99 % metaania) lämpöarvo on 50 MJ/kg (Wierzbicki 2012).

Biometaanin hintaa arvioidessa 0,1 \$/kWh on realistinen lukema (Cucchiella, Dâ€™Adamo et al. 2019). Lämpöarvolla 50 MJ/kg kyseinen hinta muuntautuu arvoon 1388,89 dollaria tonnilta. Tammikuun 2020 Japanin LNG-hintaan (284,36 \$/tonni) verrattuna biometaanin hinta on lähes viisinkertainen. Maakaasuverkkoon syötetyn biometaanin voidaan tästä syystä sanoa nostavan myös maakaasun hintaa.

LNG:tä vastaava biometaani toimii oletettavasti LNG:n tavoin, joten esimerkiksi Wärtsilän 16V46DF-moottorilla biometaanilla saavutettava hyötysuhde on 49 % ja polttoaineenkulutus 147,3 grammaa moottorin tuottamaa kilowattituntia kohden.

232 tuntisen risteilymatkan käyttämä moottoriteho on 97,02 MW ja vaadittu polttoainetehto saadaan yhtälöllä 3:

$$\Phi_{pa} = \frac{P_m}{\eta_m} \quad (3)$$

jossa	Φ_{pa}	polttoaineen lämpöteho [W]
	P_m	moottorin nettoteho [W]
	η_m	moottorin lämpöhyötysuhde [-].

Kun oletetaan, että laivan kaikki moottorit toimivat 16V46DF:n hyötysuhteella (noin 49 %), on vaadittava polttoainetehto:

$$\Phi_{pa} = \frac{97,02 MW}{0,4888} = 198,48135 \dots MW \approx 198,48 MW$$

Lasketun polttoainetehon pysyessä vakiona 232 tunnin ajan matkaan kulutetun polttoaineen energiasisältö on 46,05 GWh. Moottorit tuottavat matkan aikana 22 508 640 kilowattitunnin nettoenergiamäärän, joten matkaan käytetyn polttoaineen määrä on 147,3 g/kWh polttoaineenkulutuksella yhteensä 3 315 433 kg. Nesteytetyn maakaasun tiheydellä (440 kg/m³) kulutetun polttoaineen tilavuus on 7 535 m³. 1 389 dollarin tonnihinnalla kulutetun polttoaineen hinta on \$4 604 768.

Lähes 49 000 kilometrin rahdinkuljetusskenaariolle (56,25 MW moottoriteho) vastaavat lukemat ovat:

- polttoainetehto 115,07 MW
- käytetyn polttoaineen sisältämä energia 132,82 GWh
- moottorin tuottama kokonaisenergia 64,92 GWh
- kulutetun polttoaineen massa 9 563 079 kg
- kulutetun polttoaineen tilavuus 21 734 m³
- kulutetun polttoaineen hinta 13 282 055 dollaria

3.1.3 Metanoli

Metanoli on yksinkertainen alkoholi, joka on huoneenlämmössä nestemäistä, väritöntä ja helposti syttyvää. Biometanolia voidaan tuottaa uusiutuvasti esimerkiksi puusta tai viemärijätteistä. Kiinnostus metanolipolttoaineita kohtaan lisääntyy maailmalla usein öljyn hinnan noustessa. Metanolia voidaan käyttää dieselmootoreissa moottorin rakennemuutosten mukaan joko sellaisenaan, tai dieseliin sekoitettuna. (Priyanto 2017)

Euroopan Unioni ryhtyi vuonna 2013 rahoittamaan tutkimusta metanolin käyttömahdollisuuksista laivaliikenteessä Motorways of the Sea-projektin alaisuudessa. Ruotsi, Suomi ja Saksa osallistuivat projektiin, jossa tarkasteltiin metanolin käyttöä polttoaineena Ruotsi Gothenburgin ja Saksan Kieli välisellä merireitillä. (Priyanto 2017)

Metanolin lämpöarvo on 20,1 MJ/kg, joten sitä täytyy polttaa noin kaksinkertainen määrä IFO 180-dieseliin (40,48 MJ/kg) verrattuna saman energiamäärän vapauttamiseksi. Metanolin korvaus dieselmootorissa ei laske juurikaan moottorin hyötysuhdetta, joten myös saman moottorin bruttotehon tuotannossa dieselin ja metanolin välillä on kaksinkertainen ero polttoaineenkulutuksessa. (Stojcevski 2014)

Sovelluksena 232 tunnin risteilyyn metanolin kulutus matkan aikana on 8 445 134 kg. Metanolin tiheys on noin 790 kg/m³, joten polttoainesäiliön vaadittu minimitilavuus on tässä tilanteessa hieman yli 10 690 m³ (Stojcevski 2014). Syyskuussa 2014 metanolin hinta Pohjois-Amerikassa oli 482 dollaria tonnia kohden, jolla 8 445,13 metanolitonin hinnaksi muodostuu 4 070 554,70 dollaria (Methanex 2014).

48 708 kilometrin rahdinkuljetusmatkan tapauksessa metanolin kulutus on 21 536 947 kg eli 27 262 m³. Pohjois-Amerikan syyskuun 2014 hinnalla tapauksen polttoainekustannus on 10 380 805,08 dollaria.

Metanolin polttamisesta ei vapaudu lainkaan rikkipäästöjä, eikä yhtä suurta määrää typpioksidipäästöjä tai hiukkaspäästöjä kuin hiilivety-polttoaineiden polttamisesta. Metanoli on biohajoavaa, joten sen vuotaminen luontoon ei ole ympäristön kannalta yhtä vakava asia, kuin vaihtoehtoisten hiilivety-polttoaineiden vuotaminen, vaikka metanoli on myrkyllistä. (IMO 2016)

3.1.4 Vety

Vedystä energiansa tuottava laiva voi olla varustettu joko vetyä turbiinissa tai sylinterissä polttavalla moottorilla tai sähköä tuottavalla vetypolttokennolla.

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka muuttaa vedyn kemiallista energiaa suoraan sähköksi hapen avulla tuottaen sivutuotteenaan vettä. Polttokennossa vetyä syötetään anodille ja happea (yleensä ilman seassa) syötetään katodille. Anodin ja katodin välissä on elektrolyyttipinta, jonka läpi vedyn ionit kulkevat. Anodille jäävät elektronit siirretään sähköpiiriä pitkin katodille. Sähköpiirin sähkövirtaa voidaan käyttää hyväksi. (Appleby 1988)

Nykyisin tuotetusta vedystä noin 97 % valmistetaan maakaasusta ja muista fossiilisista polttoaineista, joten vety ei vielä ole kovin uusiutuvana pidettävä polttoaine. Vetyä voidaan kuitenkin valmistaa uusiutuvasti esimerkiksi veden elektrolyysillä, mutta vedyn uusiutuva tuotanto ei ole tällä hetkellä taloudellisesti kannattavaa. Maakaasun hintojen noustessa ja vedyn uusiutuvien tuotantotapojen kehittyessä uusiutuvan vedyn osuus voi nousta merkittävästi. (Koroneos, Dompros et al. 2004)

Maakaasun hinnan ollessa 7 \$/GJ nestemäisen vedyn kilohinnaksi muodostuu 2,4 dollaria, jos se tuotetaan maakaasusta tuotantolaitoksella, jonka tuotantokapasiteetti on noin 22 tonnia päivässä (Doty 2004). Nykyaikaisilla elektrolyysilaitteilla vedyn 2,4 dollarin kilohinta saavutetaan, kun elektrolyysiin käytetyn sähkön kokonaishinta on noin 0,049 dollaria kilowattituntia kohden (Turner, Sverdrup et al. 2008).

Helen Oy tarjoaa täysin tuulivoimalla tuotetulle sähkölle 0,0746 €/kWh sopimushintaa (Helen 2020). Suomen Pankin 9.4.2020 vallinneilla valuuttakursseilla Helen Oy:n tuulivoimasähkön sopimushinnaksi muodostuu pyöristettynä 0,08 dollaria kilowattituntia kohden (Suomen Pankki 2020). Kyseisellä sähkön hinnalla tuulivoimalla tuotetun elektrolyysivedyn hinta on nykyisellä elektrolyysitekniikalla arviolta 4 dollaria kilogrammaa kohden (Turner, Sverdrup et al. 2008). 4 dollarin kilohinta on vedyn tuotantokustannus. Vedyn myyntihinta on kannattavan yrityksen tuottamana jonkin verran korkeampi.

Polttokennoja käytetään hyvin vähäisessä määrin laivojen toissijaisina energianlähteinä. Norjan tiedenevoston rahoittamassa FellowSHIP-projektissa Viking Lady-tukialukseen asennettiin 330 kW polttokenno tukemaan laivan nesteytetyllä maakaasulla sähköä tuottavaa pääenergianlähdettä. Valittu polttokennotyyppi oli meriliikennekäyttöön modifioitu sulakarbonaattipolttokenno, jolla saavutettiin 55 % polttoainehyötysuhde lämmönkeräimien avulla. Viking Lady oli ensimmäinen laiva, joka käytti energiantuotannossa korkean lämpötilan (yli 650 °C) polttokennoa. (de-Troya, Alvarez et al. 2016)

Viking Ladyn kaltaiseen alukseen asennetulla polttokennon ja polttomoottorin yhdistelmäkäytöllä voidaan saavuttaa 20-30 % säästö polttoaineenkulutuksessa (Wärtsilä 2020).

General Motorsin PEFC-polttokennotyyppiä (Polymer Electrolyte Fuel Cell) edustavan GM2001-polttokennoston tehottiheydet ovat 1,25 kW/kg ja 1750 kW/m³ (Ahluwalia, Wang et al. 2004). Kyseisillä tehottiheyksillä Oasis of the Seas'in 97,02 MW tehon saavuttamiseen tarvitaan polttokennosto, joka on tilavuudeltaan 55,44 m³ ja massaltaan 77 616 kg. MSC Oscarille (62,5 MW) vastaavat luvut ovat 35,71 m³ ja 50 000 kg.

Vedyn varastointi laivalla on haasteellista, sillä vedyn tiheys huoneoloissa on hyvin pieni ja vety on erittäin helposti syttyvää. 1 ilmakehän paineessa vety on nestemäistä -252,8 °C lämpötilassa, jolloin nestemäisen vedyn tiheys on vain 70,85 kg/m³. (NIST 2018)

PEFC-tyypin polttokennolle 60 % on tyypillinen sähköntuottohyötysuhde vetykäytöllä (DOE 2006). Käytännössä MCFC-kenno voi siis muuntaa käyttämänsä vedyn energiasisällöstä 60 % sähköenergiaksi. Jos käytetään vetyä, jonka alempi lämpöarvo, eli tehollinen energiasisältö on 119,95 MJ/kg saadaan kilogrammasta vetyä 71,97 MJ sähköenergiaa (Chiesa, Lozza et al. 2005). Kyseisen sähköenergiantuottoisuuden, nestemäisen vedyn tiheyden ja tuulivoimalla tuotetun vedyn tuotantohinnan (4 \$/kg) perusteella vertailuskenaarioille lasketut polttoaineen kulutus, tilavuus ja hinta ovat listattuna taulukossa 2.

Taulukko 2. Risteily- ja rahdinkuljetusskenaarioiden polttoaineenkulutukset polttokennoilla

	232 h risteily	48 708 km rahtimatka
Matkaan kuluva nettoenergia [GWh]	37,51	108,21
Matkaan kulutetun polttoaineen massa [kg]	1 125 901	3 247 565
Matkaan kulutetun polttoaineen tilavuus [m ³]	15 891	45 837
Matkaan kulutetun polttoaineen tuotantohinta [\$]	4 503 604	12 990 260

Strategic Analysis, inc. arvioi vuonna 2013, että suurella massatuotannolla polttokennoston hinnaksi saadaan noin \$55/kW. Kyseisellä hinnalla 97,02 MW polttokennosto voidaan tuottaa 5 336 100 dollarin kennostoinvestoinnilla. (DOE 2013)

Milanon polyteknillisen yliopiston energiaosastossa vuonna 2003 suoritetussa tutkimuksessa suuria teollisuuskäyttöön tarkoitettuja maakaasuturbiineja käytettiin onnistuneesti ohentamattomalla vetypolttoaineella (H₂). Tutkimuksessa testikäyttöturbiinilla saavutettiin 264,5 MW nettoteho 58,32 prosentin lämpöhyötysuhteella. (Chiesa, Lozza et al. 2005)

Laivaan asennettuna kaasuturbiinin tuottama teho voidaan hyödyntää sähkögeneraattorin avulla tai mekaanisesti voimansiirtoakseleilla. Jos oletetaan, että testikäytön turbiini voidaan ”kutistaa” laivalle sopivaan kokoon siten, että sen tekninen suorituskyky muuttuu samassa suhteessa, saadaan Oasis of the Seas:lle sopivan 97,02 MW turbiinin hyötysuhteeksi myös 58,32 %. Turbiinin nettotehon tuottamiseen vaadittava polttoainetehto saadaan yhtälöllä 3:

$$\Phi_{pa} = \frac{P_m}{\eta_m} = \frac{97,02 \text{ MW}}{0,5832} = 166,35802 \dots \text{ MW} \approx 166,36 \text{ MW}$$

Vetypolttoaineelle tyypillinen alempi lämpöarvo on 119,95 MJ/kg (Chiesa, Lozza et al. 2005). Lämpöarvon avulla turbiinin polttoaineenkulutus voidaan laskea yhtälöllä 4:

$$q_{m,pa} = \frac{\Phi_{pa}}{LHV_{pa}} \quad (4)$$

jossa	$q_{m,pa}$	polttoaineen massavirta [kg/s]
	Φ_{pa}	polttoaineteho [W]
	LHV_{pa}	polttoaineen alempi lämpöarvo [MJ/kg].

97,02 MW teholla toimiva vuoden 2003 tutkimuksen mukainen kaasuturbiini kuluttaa polttoainetta yhtälöllä 4 laskettuna:

$$\begin{aligned} q_{m,pa} &= \frac{166,36 \text{ MW}}{119,95 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = \frac{166,36 \frac{\text{MJ}}{\text{s}}}{119,95 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 1,38689 \dots \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 1,39 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \\ &\approx 4993 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \end{aligned}$$

232 tunnin risteilyllä, jolla polttoaineenkulutus pysyy vakiona 97,02 MW moottoritehon tuotannossa, vetypolttainetta kuluu yhteensä noin 1 158 334 kg, eli noin 38,60 GWh edestä. 4 dollarin kilohinnalla lasketun vetymäärän tuotantohinta on noin 4 633 336 dollaria. Polttoainetehon tarvetta voidaan mahdollisesti pienentää hyödyntämällä turbiinin savukaasujen hukkalämpöenergiaa höyryturbiinin avulla.

Vuoden 2003 tutkimustulosten esittelemän vetyturbiinin soveltaminen MSC Oscar:in täyden toimintamatkan skenaariossa vedyn vaadittu polttoaineteho on yhtälön 3 mukaisesti:

$$\Phi_{pa} = \frac{56,25 \text{ MW}}{0,5832} = 96,45061 \dots \text{MW} \approx 96,45 \text{ MW}$$

Polttoainetehon ja yhtälön 4 avulla saatava polttoaineenkulutus rahdinkuljetusskenaariossa:

$$q_{m,pa} = \frac{96,45 \frac{\text{MJ}}{\text{s}}}{119,95 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}} = 0,80409 \dots \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 2895 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Rahdinkuljetusskenaarion ajallinen kesto on 1154,2 tuntia, joten 56,25 MW vakioteholla kuljetun matkan kokonaispolttoaineenkulutus on 3 341 116 kg, joka on energiasisällöltään 111,32 GWh ja tuotantohinnaltaan (4 \$/kg) yhteensä noin 13 364 464 dollaria.

1 ilmakehän paineessa ja $-252,8$ °C lämpötilassa säilytettynä 232 tunnin risteilyn kuluttama vetymäärä vie tilaa $16\,349\text{ m}^3$ ja 48 708 kilometrin rahtimatkan kuluttama vetymäärä $47\,158\text{ m}^3$. Vedyn pitäminen $-252,8$ °C lämpötilassa vaatii kalliita säiliöinvestointeja ja suuria määriä energiaa. Vedyn kylmänä pitämisen kuluttaman energian vuoksi vetyä polttavan laivan moottorilta vaaditaan normaalia suurempi nettoteho jäähdytysenergian tuottamiseksi. Vedyn paineen nostaminen nostaa sen kiehumispistettä, joten painesäiliön lämpötilaa voidaan pitää jonkin verran korkeampana kuin $-252,8$ °C. Jäähdytysenergian tarvetta ei ole otettu huomioon tämän kappaleen laskuissa.

3.2 Sähkö

3.2.1 Varastoidun sähkön käyttö

Varastoidulla sähköllä toimivasta laivasta voidaan tehdä hyvin vähäpäästöinen lataamalla sen käyttöakut satamassa uusiutuvalla energialla tuotetulla sähköllä. Nykyisen akkuteknologian vajaavaisuuksien takia varastoidulla sähköllä toimivien laivojen kehitys on vielä melko alkeellisella tasolla.

Varastoitu sähkö soveltuu erinomaisesti lähes kaikkiin laivan energiankäyttökohteisiin, sillä sähköä on helppo muuttaa muiksi energiamuodoiksi, kuten mekaaniseksi energiaksi varsin hyvällä hyötysuhteella. Mikäli laivan potkureille asennetaan omat sähkömoottorit, ei laivassa tarvita montaa potkuria pyörittävää päämoottoria. Tällöin sähkötoimiselta, Oasis of the Seas:in kokoiselta ja suorituskyvyltään sitä vastaavalta sähkölaivalta, jonka potkurihäviöiden oletetaan olevan mitättömiä, vaaditaan 232 tunnin ja 8679 km matkaan $22\,508\,640\text{ kWh}$ sähköenergiämäärä.

Panasonicin nykyaikaisilla NCR18650BF-mallin akuilla on 248 Wh/kg massakohtainen ja 677 Wh/l tilavuuskohtainen energiatiheys. Kyseisissä energiatiheysluvuissa otetaan huomioon vain akun sähkövirtaa varastoiva ja tuottava sisus. Kyseinen akku on kehittynyt ja soveltuu koottavaksi suuriksikin akkukenkoiksi. (Panasonic)

Yksinomaan Panasonicin NCR18650BF akuilla varustetussa aluksessa tarvitaan valtava akkukapasiteetti 232 tunnin risteilyyn menevän lasketun sähköenergiamäärän varastointiin. Akkuja tarvitaan vähintään 90 760 645 kg edestä ja ne vievät tilaa lähes 33 248 m³. Akkujen kehitystaso on suurten risteilyalusten suorituskykytarkoitukseen aivan liian alhainen. Vaadittu akkumäärä on Oasis of the Seas:in vaadittuun polttoainemäärään verrattuna massaltaan 21,6-kertainen ja tilavuudeltaan 7,9-kertainen. 90 761 tonnin akusto on kohtuuttoman painava laivaliikenteen hyödynnettäväksi.

Tammikuussa 2020 sähkön keskimääräinen liikennekäyttöhinta Texasissa oli \$0,0655/kWh (EIA 2020). Kyseisellä hinnalla 22 508 640 kWh sähköenergiamäärän hankintakustannus on 1 474 315,92 dollaria. Texasin liikennekäyttösähkö on tuskin täysin uusiutuvasti tuotettua, mutta sen hintaa käytetään siitä huolimatta, sillä sähköverkossa olevan sähkövirran oletetaan olevan ”sekoitus” uusiutuvasti ja uusiutumattomasti tuotettua sähköä, eikä sähköä vielä erotella eri verkkoihin tuotantotavan mukaan.

Teoreettisessa rahdinkuljetusskenaariossa, jossa matkataan 56,25 MW moottoriteholla lähes 49 000 kilometrin yhtämittainen matka vaaditaan sähkönvarastointikapasiteetiksi vähintään 64,92 GWh. Panasonicin NCR18650BF akuilla, jotka oletetaan häviöttömiksi tarkastelun yksinkertaistamiseksi, 64,92 GWh voidaan varastoida teoriassa noin 261 791 tonnin massaiseen ja 95 900 m³ tilavaan akustoon 4 252 535,1 dollarin latauksella.

Akkujen suuri massa nostaisi laivan massaa huomattavasti, mikä taas lisäisi energiankulutusta. Akkujen massasta johtuvaa energiankulutuksen ja -tarpeen kasvua ei oteta vertailulaskuissa huomioon.

3.2.2 Laivalla tuotetun uusiutuvan sähkön käyttö

Aurinkopaneelit ovat jo käytössä usealla aluksella parantamassa aluksen kokonaisenergiatehokkuutta tuottamalla sähkövirtaa moniin laivan järjestelmiin ja

laitteisiin. Aurinkopaneelit täydentävät hyvin laivan energiajärjestelmää sekundäärienergianlähteenä, mutta aurinkopaneeliteknologia on kuitenkin liian alikehittynyttä toimiakseen laivan pääenergianlähteenä. Esimerkiksi Fortumin XL-aurinkopaneelipaketin nimellishuipputeho on 12,2 kW ja sen pinta-ala on 56 m² (Fortum 2020). Jotta kyseisillä aurinkopaneeleilla saataisiin saavutettua Oasis of the Seas'in moottoriteho (97 020 kW) tarvitaan aurinkopaneeleita noin 445 338 m² edestä. Tarvittava pinta-ala vastaa neliötä, jonka sivun pituus on 667 metriä. Vastaavasti Oasis of the Seas on 360 metriä pitkä ja 65 metriä leveä, joten sen kansipinta-ala on muutamia prosentteja laivan huipputehon saavuttamiseen vaadittujen aurinkopaneelien yhteispinta-alasta.

Edes 445 338 neliömetrin aurinkopaneelikate ei riittäisi vastaamaan laivan suorituskykyä, sillä aurinko ei paista jatkuvasti. Tästä syystä aurinkopaneeleita tulisi todellisuudessa olla moninkertainen määrä, jolloin auringon paistaessa suurin osa tuotetusta sähköstä varastoitaisiin ja käytettäisiin, kun auringonpaistetta ei ole. Aurinkopaneeli-investoinnin lisäksi aurinkoenergiaa tuottavaan laivaan olisi tehtävä myös mittavat akkuinvestoinnit.

Tuuli- ja aaltoenergiaa hyödynnetään meriliikenteessä toistaiseksi vain tuulen ja aaltojen kineettisen energian luoman työntövoiman muodossa käyttämällä purjeita ja siivekkeitä. Sähkön tuotanto tuuli- tai aaltoenergialla on tällä hetkellä olematonta meriliikenteessä. Aurinkokennoteknologian kehitys näkyy toistaiseksi laivaliikenteessä vain vähennyksenä polttoaineenkulutuksessa.

4 ENERGIAMUOTOJEN VERTAILU

Tässä kappaleessa energiamuotoja vertaillaan teknisten ominaisuuksien ja päästöjen osalta vertailuskenaarioiden avulla. Energiamuodoille ja niiden käytölle lasketut arvot ovat listattuina taulukoihin ja diagrammeihin, mikä tekee niiden vertailusta helppoa.

4.1 Tekniset ominaisuudet

Taulukossa 3 on esitettyä 232 tunnin risteilyn vaatimukset uusiutuvilla energiamuodoilla. Vertailussa tarkastellaan risteilyyn vaadittavan nettoenergian eli kulutetun käyttövoiman energiasisällön määrää [GWh], kulutetun käyttövoiman massaa [tuhatta kg], kulutetun käyttövoiman tilavuutta [m^3], sekä käyttövoiman risteilykohtaista hintaa [\$]. Laivalle varastoidun sähkön käytössä käyttövoiman massan ja tilavuuden arvoina käytetään matkaan vaaditun energian säilyttämiseen käytettävien akkujen kokonaismassaa ja -tilavuutta. Kyseiset arvot merkitään taulukkoon kursivoituna. Kulutetun vedyn kustannuksessa käytetään tuulivoimalla tuotetun vedyn tuotantokilohintaa.

Taulukko 3. Energiamuotojen tekninen vertailu 232 tunnin risteilyskenaariossa

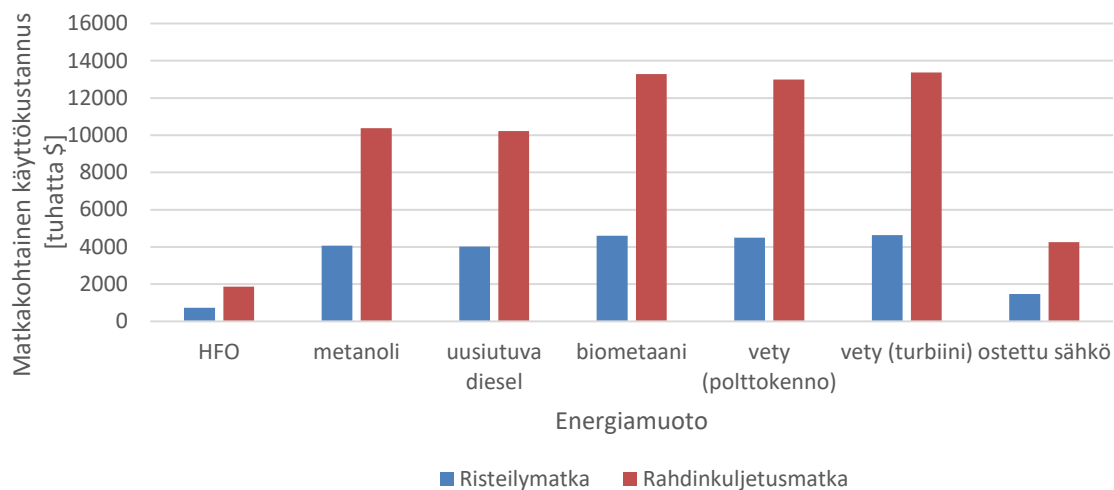
Energianlähde	Nettoenergia [GWh]	Käyttövoiman massa [10^3 kg]	Käyttövoiman tilavuus [m^3]	Risteilykohtainen kustannus [\$]
Raskas polttoöljy (HFO)	47,2	4 193	4 214	733 838
Metanoli	47,2	8 445	10 690	4 070 554
Uusiutuva diesel	47,2	3 849	4 999	4 009 960
Biometaani	46,0	3 315	7 535	4 604 768
Vety (polttokenno)	37,5	1 126	15 891	4 503 604
Vety (turbiini)	38,6	1 158	16 349	4 633 336
Ostettu sähkö	22,5	90 761	33 248	1 474 316

MSC Oscar:in maksimimatkan tapauksen tarkastelussa käytetty taulukko 4 vastaa ulkomuodoltaan taulukkoa 3.

Taulukko 4. Energiamuotojen tekninen vertailu 48 708 kilometrin rahdinkuljetusskenaariossa

Energianlähde	Nettoenergia [GWh]	Käyttövoiman massa [10^3 kg]	Käyttövoiman tilavuus [m^3]	Risteilykohtainen kustannus [\$]
Raskas polttoöljy (HFO)	120,3	10 694	10 747	1 871 448
Metanoli	120,3	21 537	27 262	10 380 805
Uusiutuva diesel	120,3	9 816	12 748	10 226 280
Biometaani	132,8	9 563	21 734	13 282 055
Vety (polttokenno)	108,2	3 248	45 837	12 990 260
Vety (turbiini)	111,3	3 341	47 158	13 364 464
Ostettu sähkö	64,9	261 791	95 900	4 252 535

Kuvassa 4.1. on taulukoituna molempien vertailuskenaarioiden matkakohtaiset käyttökustannukset energianlähteittäin.



Kuva 4.1. Vertailumatkojen matkakohtaiset käyttövoimakustannukset tuhansissa dollareissa

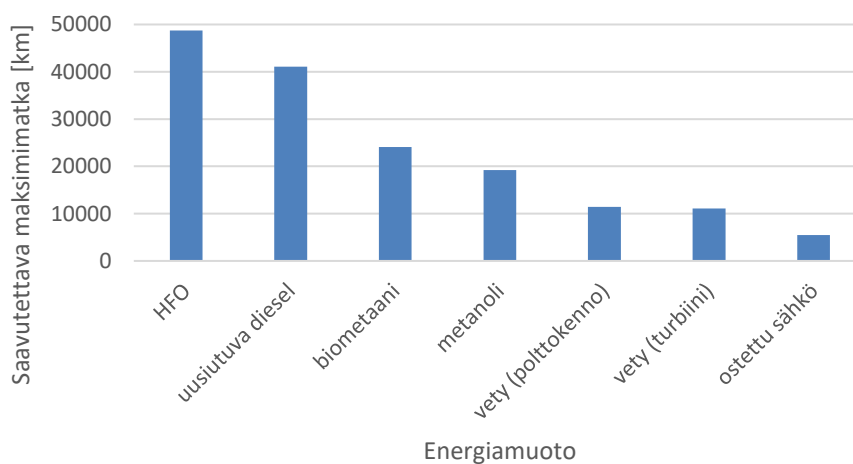
Kustannuslaskelmien perusteella raskaan polttoöljyn ja uusiutuvien energiamuotojen yhteiskäytölle ei ole taloudellisia perusteita.

Mikäli 48 709 kilometrin rahtimatkan aikana kulutettavan polttoaineen suurimmaksi sallituksi tilavuudeksi asetetaan rahtikapasiteetin säilymisen vuoksi 10 747 m³ eli matkaan kuluvan HFO:n tilavuus, saadaan eri energiamuodoilla saavutettaviksi maksimimatkoiksi taulukon 5 mukaiset arvot. Maksimimatkan laskennassa matkan ja käyttövoiman tilavuuden oletetaan muuttuvan samassa suhteessa käänteisesti siten, että käyttövoiman tilavuuden tuplaantuminen puolittaa maksimimatkan. Sähköllä saavutettavan matkan laskennassa käytetään akkujen tilavuutta.

Taulukko 5. Eri energiamuodoilla saavutettavat matkat rahdinkuljetusskenaariossa, kun polttoaineen enimmäistilavuus on 10 747 kuutiometriä

Energianlähde	Pisin saavutettava matka [km]
Raskas polttoöljy (HFO)	48 708
Metanoli	19 201
Uusiutuva diesel	41 062
Biometaani	24 082
Vety (polttokenno)	11 420
Vety (turbiini)	11 100
Ostettu sähkö	5 458

Taulukon 5 arvojen perusteella jokainen tarkasteltavista uusiutuvista energiamuodoista vähentäisi rahtilaivan suurinta mahdollista käyttösädettä. Joidenkin energiamuotojen kohdalla käyttömatala pienenesi liian pieneksi jopa Euroopan ja Aasian välisille merireiteille. Tarkasteltavista energianlähteistä vain uusiutuva diesel onnistuu säilyttämään yli 80 % siitä maksimimatkasta, joka HFO:lla saavutetaan. Kuvassa 4.2. on esitetty taulukon 5 arvot pylväsdiagrammin muodossa.



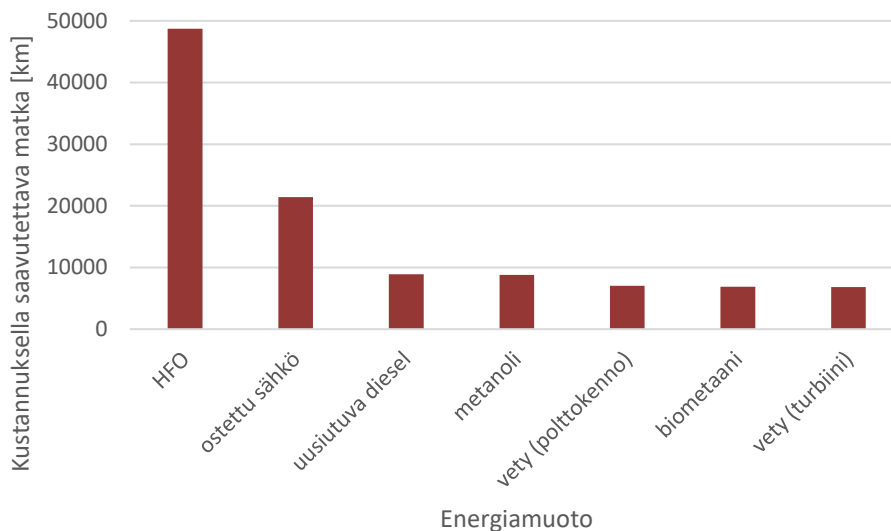
Kuva 4.2. Eri energiamuodoilla saavutettavien matkojen pituudet polttoainetilavuuden ollessa 10 747 kuutiometriä

Kaupallisessa käytössä olevan laivan pääenergianlähteen käyttökustannus vaikuttaa todella keskeisesti energianlähteen kannattavuuteen. Mikäli vastaavanlainen maksimimatkavertailu suoritetaan rahtimatkaskenaariolle siten, että suurin sallittu matkakohtainen kustannus on 1 871 448 dollaria, eli skenaariossa kuluneen HFO:n kokonaishinta, niin energiamuotojen kustannusten vaikutus rahtimatkaan voidaan taulukoida ja havainnollistaa pylväsdiagrammeilla. Taulukossa 6 on esitetty energiamuodoilla saavutettava matka rahdinkuljetusskenaariossa kiinteällä matkakohtaisella kustannuksella.

Taulukko 6. Rahtimatkan maksimimatkavertailu noin 1,9 miljoonan dollarin matkakohtaisella kustannuksella

Energianlähde	Pisin saavutettava matka [km]
Raskas polttoöljy (HFO)	48 708
Metanoli	8 781
Uusiutuva diesel	8 914
Biometaani	6 863
Vety (polttokenno)	7 017
Vety (turbiini)	6 821
Ostettu sähkö	21 435

Kuvassa 4.3. on taulukon 6 arvot pylväsdiagrammina.



Kuva 4.3. Risteilyskenaariossa suurin saavutettava matka, kun matkakohtainen energiakustannus on noin 1,9 miljoonaa dollaria

Taulukon 6 arvojen perusteella polttoainekustannusten osalta HFO on 4.4.2020 vallinneella raakaöljyn hinnalla taloudellisesti tarkasteltuna ylivoimaisesti kannattavin vaihtoehto. Taloudellisesti toiseksi kannattavinta energiamuotoa, ostettua sähköä ei voida akkujen kehitystason takia käyttää laivan pääenergianlähteenä. Käytännöllisin uusiutuva energiamuoto maksimimatkatavertailussa on kuvien 4.2. ja 4.3. diagrammien perusteella uusiutuva diesel eli HVO.

Kustannuspohjaisessa maksimimatkatavertailussa uusiutuvien energiamuotojen negatiivinen vaikutus laivan toimintasäteeseen on vielä suurempi kuin tilavuuspohjaisessa vertailussa. Kuvan 4.2. pylväsdiagrammin mukainen tilavuusperusteinen maksimimatkatavertailu eri energiamuotojen välillä pysyy todennäköisesti melko muuttumattomana, mutta kustannuksiin perustuvan maksimimatkadigrammin (kuva 4.3.) muoto muuttuu jatkuvasti. Uusiutuvien energiamuotojen kehityksen ansiosta niiden käytön taloudellinen kannattavuus paranee tulevaisuudessa jopa niin paljon, että ne saavuttavat kustannusperusteisessa maksimimatkatavertailussa HFO:n tason.

4.2 Päästöt

Laivaliikenteen päästöt ovat suurina vaikuttajina pyrkimyksissä uusiutuvien energiamuotojen käyttöönottoon meriliikenteessä, joten tarkasteltujen energiamuotojen käyttöpäästöjen vertailu on olennainen osa energiamuotojen vertailua.

Taulukossa 7 on listattuna eri energiamuotojen käytöstä aiheutuvien päästöjen määrä. Päästöt ilmoitetaan energiamuodon tuottamaan nettoenergiamäärään suhteutettuna yksikössä g/kWh. MGO:n ja HFO:n päästöjen laskennassa käytetään taulukon 1 lämpöarvoja. Vertailussa tarkasteltavat päästöt ovat hiilidioksidi (CO₂), typen oksidit (NO_x), rikkidioksidi (SO₂) ja hiukkaspäästöt (PM). Taulukossa ilmoitetaan vain polttoaineen käytöstä syntyvät päästöt (tank-to-propeller-päästöt).

Sähkön käytöstä ei synny lainkaan päästöjä. Jos sähkö on tuotettu uusiutuvasti, niin myös sen tuotanto on päästötöntä. Tästä syystä täyssähkölaivan ei oleteta tuottavan lainkaan kasvihuonekaasu- tai hiukkaspäästöjä. Vedyllä toimivan polttokennon ei myöskään oleteta tuottavan toimiessaan päästövertailussa listattuja päästöjä, sillä vedyn yhtyminen happeen tapahtuu polttokennossa kontrolloidusti ilman spontaania palamisreaktiota. (EPA 2015)

Korkealla hyötysuhteella toimivan vetyturbiinin typenoksidipäästöt ovat tarkastelun kannalta niin pienet, ettei niitä oteta huomioon. Muita päästötarkastelun päästöjä vedyn polttamisessa ei synny. (Bancalari, Chan et al. 2006)

Puhdas biometaani on koostumukseltaan lähellä maakaasua, joka on pääosin metaania, joten biometaanin päästövertailussa käytetään IMO:n ilmoittamia tyypillisiä LNG:n päästöarvoja.

Nesteen NExBTL:n käyttö tuottaa 9 prosenttia vähemmän typen oksideja ja 33 prosenttia vähemmän hiukkaspäästöjä, kuin tavallinen diesel (Neste 2012). Vähennys hiilidioksidipäästöissä on noin 5 prosenttia ja se johtuu NExBTL:n fossiilista dieseliä suuremmasta vety-hiili-suhteesta. Päästövertailussa kyseiset vähennykset tehdään MGO:lle ja saatuja arvoja käytetään uusiutuvalle dieselille. NExBTL sisältää rikkiä maksimissaan 5 mg/kg, joten rikkidioksidipäästöt voidaan laskea olettaen, että kaikki

polttoaineen sisältä rikki palaa rikkidioksidiksi. 5 mg/kg on niin pieni määrä, ettei sitä päästövertailun mittakaavassa oteta huomioon. (Neste 2016)

Taulukko 7. Energiamuotojen aiheuttamat päästöt (IMO, 2015)

Energianlähde	CO ₂ [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	SO ₂ [g/kWh]	PM [g/kWh]
MGO	274,903	8,240	0,857	0,083
HFO	276,951	8,031	2,223	0,647
LNG	220,000	1,120	0	0,014
Metanoli	242,707	0,985	0	0,015
Uusiutuva diesel	261,158	7,498	0	0,056
Vety (polttokenno)	0	0	0	0
Vety (turbiini)	0	0	0	0
Sähkö (uusiutuva)	0	0	0	0

Uusiutuvien energiamuotojen teknisten vertailujen pohjalta vertailuun käytettävien skenaarioiden tuottamia kokonaispäästöjä vertaillaan taulukoissa 8 ja 9. Taulukko 8 käsittelee 232 tunnin risteilyä ja taulukko 9 noin 49 000 kilometrin rahtikuljetusta. Kokonaispäästöjä tarkastellaan hiilidioksidin, rikkidioksidin, typen oksidien ja hiukkaspäästöjen osalta ja niiden laskennassa käytetään taulukossa 7 listattuja energiamuotokohtaisia päästöarvoja. Tarkasteluun valittavat energiamuodot ovat HFO, MGO, uusiutuva diesel, metanoli ja biometaani. Kokonaispäästöt ilmoitetaan tonneissa (1000 kg).

Risteilyskenaarion päästölaskelmissa käytettävät kokonaisnettoenergiat luetaan taulukosta 3.

Taulukko 8. 232 tunnin risteilyn kokonaispäästöt energianlähteittäin

	CO ₂ [10 ³ kg]	NO _x [10 ³ kg]	SO ₂ [10 ³ kg]	PM [10 ³ kg]
HFO	13 059	379	105	31
MGO	12 962	389	40	4
Metanoli	11 444	46	0	0,7
Uusiutuva diesel	12 327	354	0	2,6
Biometaani	10 120	52	0	0,6

Risteilyskenaarion päästölaskelmissa käytettävät kokonaisnettoenergiat taulukosta 4.

Taulukko 9. 48 708 km rahtinkuljetusmatkan kokonaispäästöt energianlähteittäin

	CO ₂ [10 ³ kg]	NO _x [10 ³ kg]	SO ₂ [10 ³ kg]	PM [10 ³ kg]
HFO	33 323	966	267	78
MGO	33 077	991	103	10
Metanoli	29 203	119	0	2
Uusiutuva diesel	31 417	902	0	6,7
Biometaani	29 216	149	0	1,9

Tarkasteltavista uusiutuvista energiamuodoista jokainen eliminoisi laivan rikkipäästöt. Uusiutuva diesel olisi vertailun energiamuodoista ainoa, jonka käyttöönotto ei vähentäisi typenoksidipäästöjä huomattavasti. Hiilidioksidipäästöt pienenisivät joillain energiamuodoilla hieman ja toisilla ne häviäisivät lähes kokonaan. Myös hiukkaspäästöissä tapahtuisi merkittävä väheneminen uusiutuvien energiamuotojen käyttöönoton seurauksena.

4.3 Saatavuus

Uusiutuvien polttoaineiden saatavuus satamissa on toistaiseksi huono. Joissain satamissa laivat voidaan kytkeä sataman sähköverkkoon, jotta laivan järjestelmiä voidaan käyttää, vaikka moottorit eivät olisi käynnissä. Ystadin satamassa Ruotsissa otettiin vuonna 2012 käyttöön järjestelmä, jolla risteilyalukset voidaan kytkeä jopa 10 MW tehoiseen sähköverkkoon. Ostetun sähkön risteilyskenaariossa risteilymatkaan vaadittavan sähkön määrä on 22,5 GWh, ja sen häviöttömään lataamiseen kuluisi 10 MW sähköteholla aikaa 2250 tuntia eli noin kolme kuukautta. Ystadin sataman sähköjärjestelmää ei ole suunniteltu akkujen lataamiseen, mutta se on tehokas satamien mittapuulla. Sähkölaivojen kehitys nostaisi todennäköisesti satamien sähköjärjestelmien tehoa, mutta sähkönsiirtoverkon kapasiteetti asettaa satamasähköjärjestelmille rajat. (HELCOM 2019)

Maakaasuverkkoon syötettynä biometaanina voidaan jo toimittaa nesteytettynä useisiin satamiin, mikäli sitä nesteytetään maakaasuverkon maakaasuseoksesta. LNG-tankkauksen mahdollistavia satamia jo ympäri maailmaa ja niiden määrä lisääntyy maakaasun laivaliikennekäytön lisääntyessä (Herdzik 2013). Itämeren alueella on useita satamia, jonne on jo mahdollista varastoida yli 100 000 kuutiometriä nesteytettyä maakaasua. LNG-varastointikykyltään suurin Itämeren satama on Gazpromin operoima satama Vysotskissa Venäjällä ja sinne voidaan varastoida 1 500 000 m³ nesteytettyä maakaasua (HELCOM 2019).

Uusiutuvaa dieseliä voidaan siirtää satamien nykyisillä polttoainejärjestelmillä ilman muutosinvestointeja, sillä sitä voidaan sekoittaa esimerkiksi raskaan polttoöljyn joukkoon ongelmitta. HVO-tyypin uusiutuvan dieselin vuosittainen globaali tuotantokapasiteetti oli vuonna 2018 noin 5 miljoonaa tonnia. Uusiutuvan dieselin päätymistä laivaliikenteeseen hidastaa tulevaisuudessa luultavasti sen suuri kysyntä maantie- ja lentoliikenteessä. (E4tech 2018)

Metanolia tuotetaan maailmalla runsaasti ja sen kuljettaminen on helppoa ja turvallista. Metanolin tankkaus laivoihin tapahtui vuonna 2015 kuorma-autoilla, jotka tuovat metanolin suoraan tankkauspisteelle. Metanolin maailmanlaajuinen tuotantokapasiteetti on yli 100 miljoonaa tonnia. Metanoli-infrastruktuuri on pääosin kemianteollisuuden käytössä, mutta mikäli metanolin kysyntä laivapolttoaineena kasvaa tarpeeksi, laajenee

se todennäköisesti satamiin. Mikäli metanolin toimitusinfrastruktuurin kehitys on hidasta, voidaan satamien läheisyyteen sijoittaa metanolintankkauslaitoja. (FCBI Energy 2015)

Vetypolttoaineen saatavuus on tällä hetkellä olemattomalla tasolla kaupallisissa satamissa. Esimerkiksi Yhdysvaltojen ja Kiinan välisen merireitin varrella ei alkuvuodesta 2020 ollut yhtään satamaa, jossa vetypolttoaineen tankkaaminen olisi mahdollista (Mao, Rutherford et. al. 2020). Vetypolttoaineen tankkausvalmius vaatii satamalta vetyvarastoja, jotka ovat suuria ja turvallisia. Lisäksi vedyn kuljetushaasteitten takia sen tuotannon olisi kannattavaa olla sataman yhteydessä.

5 YHTEENVETO

Meriliikenteen energianlähteistä yleisimmät ovat eri diesellaadut, erityisesti raskas polttoöljy. Suurten laivojen mittava polttoaineenkulutus ja raskaan polttoöljyn rikkipitoisuus kasvattavat laivaliikenteen päästöjen määrän valtavaksi. Suuria rikkipäästöjä pyritään jo vähentämään kansainvälisillä säädöksillä, sekä kevyen polttoöljyn ja nesteytetyn maakaasun käytöllä. Raakaöljyn hinnanmuutokset ja päästötavoitteet ajavat meriteollisuutta kohti uusiutuvien energianlähteiden käyttöä, vaikka muutosta jarruttaa raskaan polttoöljyn alhainen hinta.

Meriliikenteelle soveltuvien uusiutuvien energiamuotojen ja niiden kehitystasojen vertailussa havaittiin, että helpoin tapa uusiutuvien energiamuotojen käyttöönottoon on korvata laivaliikenteen fossiiliset polttoaineet niitä ominaisuuksiltaan vastaavilla uusiutuvilla polttoaineilla, kuten uusiutuvalla dieselillä, biodieselillä ja biometaanilla. Uusiutuvan dieselin ja biometaanin päästöt ovat fossiilisen dieselin ja maakaasun tasolla tai hieman pienemmät, mutta saatavuus on toistaiseksi suppeampaa ja biopohjaisten hiilivety-yhdisteiden hinta on valmistuskustannusten takia fossiilisia hiilivety-yhdisteitä korkeampi. Biometaanin hyvin korkea hinta tekee siitä toistaiseksi vielä liian kalliin polttoaineen laivaliikenteen käytettäväksi. Myös uusiutuvan dieselin hinta on korkeampi, kuin fossiilisilla polttoöljyillä, mutta se luultavasti laskee huomattavasti tulevaisuudessa uusiutuvan dieselin saatavuuden parantuessa.

Tietyillä muutosinvestoinneilla valtaosa laivojen dieselmoottoreista voidaan soveltaa käyttämään biomassasta tai jätteistä valmistettua metanolia. Metanolin ei kuitenkaan todettu olevan kovin kilpailukykyinen polttoaine dieselin rinnalla, jolla on kaksinkertainen energiasisältö metanoliin verrattuna.

Polttokennoteknologian korkean kehitysasteen ansiosta vety on jo käytössä laivaliikenteen energianlähteenä. Polttokennot voidaan asentaa laivan pääkäyttösähköntuotantoon kohtuullisella investoinnilla. Polttokennojen lisäksi vedyllä on mahdollista tuottaa energiaa polttamalla sitä moottorissa tai turbiinissa. Vetyä tuotetaan tällä hetkellä pääosin fossiilisista hiilivety-yhdisteistä, mutta sen tuotanto uusiutuvasti on mahdollista. Uusiutuvalla sähköllä tuotettu vety on vielä huomattavasti kalliimpaa, kuin esimerkiksi maakaasusta tuotettu vety.

Voimalaitoksessa tuotettu sähkö ei tällä hetkellä sovellu meriliikenteessä muiden, kuin pienten alusten energianlähteeksi. Suurten laivojen energiantarpeen havaittiin olevan liian suuri akkujen nykyiselle energianvarastointikyvyille, joten varastoitua sähköä voidaan tällä hetkellä käyttää suurissa laivoissa vain laivan järjestelmien käyttämiseen. Akkujen valtava kehittyminen ei yksin riittäisi täyssähkölaivojen käyttöönottoon, vaan myös satamien latausjärjestelmien pitäisi olla kykeneviä lataamaan hyvin suuria akkuja lyhyessä ajassa. Voimalaitossähkön hyvä puoli on sen kohtuullinen hinta. Laivalla tuotettu sähkö riittää tällä hetkellä ja lähitulevaisuudessa vain laivan pääenergianlähteen tueksi.

Tuulen ja aaltojen energiaa hyödyntäviä innovaatioita on meriliikenteessä käytössä jossain määrin. Työssä ei paneuduttu niiden tarjoaman potentiaalın suuruuteen, vaikka tuulen ja aaltojen kineettistä energiaa hyödyntäviä laitteita on asennettu laivoihin. Nykyisin esimerkiksi risteilyalusikäytössä olevien roottoripurjeiden ja tuulipurjeiden havaittiin vähentävän laivan polttoaineenkulutusta kiitettävästi. Tuulienergian vähäinen tarkastelu tässä työssä johtuu siitä, ettei tuulienergialla suoranaisesti saatava energiamäärä riitä kattamaan kovin suurta osaa laivan kokonaisenergiantarpeesta.

LÄHDELUETTELO

Adamchak, F., Adede, A., 2013. LNG as marine fuel, 17th International conference and 2013.

Ahluwalia, R.K., Wang, X., Rousseau, A., Kumar, R., 2004. Fuel economy of hydrogen fuel cell vehicles. *Journal of Power Sources*, 130(1-2), pp. 192-201.

Appleby, A.J., 1988. *Fuel cell handbook*.

Baltic Marine Environment Protection Commission (Helsinki Commission – HELCOM), 2019. Alternative fuels for shipping in the Baltic Sea Region [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/10/HELCOM-EnviSUM-Alternative-fuels-for-shipping.pdf>

Bancalari, E., Chan, P., Diakunchak, I.S., 2006. Advanced hydrogen turbine development, 23rd International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, Pennsylvania 2006, Citeseer.

Bunkerex, 2020. Live Bunker Prices [Bunkerex:n www-sivut]. [viitattu 4.4.2020]. Saatavissa: <https://www.bunker-ex.com/bunker-prices/>

Chiesa, P., Lozza, G., Mazzocchi, L., 2005. Using hydrogen as gas turbine fuel. *J.Eng.Gas Turbines Power*, 127(1), pp. 73-80.

Corbett, J.J., Winebrake, J.J., 2008. Emissions tradeoffs among alternative marine fuels: total fuel cycle analysis of residual oil, marine gas oil, and marine diesel oil. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(4), pp. 538-542.

Cucchiella, F., D'Adamo, I., Gastaldi, M., 2019. Sustainable Italian Cities: The Added Value of Biomethane from Organic Waste. *Applied Sciences*, 9(11), pp. 2221.

De Marco, A., Mancini, S., Pensa, C., Calise, G., De Luca, F., 2016. Flettner rotor concept for marine applications: A systematic study. *International Journal of Rotating Machinery*, 2016.

Department of Energy (DOE), 2013. Fuel Cell System Cost – 2013 [verkkojulkaisu]., Saatavissa:

https://web.archive.org/web/20131202225059/http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/13012_fuel_cell_system_cost_2013.pdf

Deremince, B., Königsberger, S., 2018. Biogas & Biomethane, Workshop on the Supply Potentials and Renewable Gases for TYNDP 2018.

De-Troya, J.J., Alvarez, C., Fernández-Garrido, C., Carral, L., 2016. Analysing the possibilities of using fuel cells in ships. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), pp. 2853-2866.

Doty, F.D., 2004. A realistic look at hydrogen price projections. Doty Scientific, Inc.Columbia, .

E4tect, 2018. Master plan for CO2 reduction in the Dutch shipping sector – Biofuels for shipping.

Elgohary, M.M., Seddiek, I.S., 2012. Comparison between Natural Gas and Diesel Fuel Oil Onboard Gas Turbine Powered Ships. *Journal of King Abdulaziz University: Marine Sciences*, 23(2).

Energy and Environmental Solutions, 2000. Fuel Cell Handbook, Fifth Edition, Yhdysvallat, DOI: 10.2172/769283

Euroopan komissio, 2002. Study/C.1/01/2002 Advice on the costs to fuel producers and price premia likely to result from a reduction in the level of sulphur in marine fuels marketed in the EU. Saatavissa:

<https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/020505bunkerfuelreport.pdf>

FCBI Energy, 2015. Methanol as a marine fuel report [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>

Finlex, 2014. 1015/2014 Valtioneuvoston asetus mittayksiköistä [Finlex:n www-sivut]. [viitattu 31.3.2020]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141015>

Fortum, 2020. Aurinkopaneelipaketti suurimmille omakotitaloille [Fortum:in www-sivu]. [viitattu 1.4.2020]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/kotiasiakkaille/aurinkopaneelit/aurinkopaneelit/xl-paketti>

Fridell, E., Winnes, H., Styhre, L., 2013. Measures to improve energy efficiency in shipping.

Helen, 2020. Tuulisähkö – tuulen ystävän ykkösvalinta [Helen Oy:n www-sivut]. [viitattu 17.4.2020]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/sahko/sahkosopimus/tuulisahko>

Heidriz, J., 2013. Consequences of using LNG as a marine fuel. Journal of KONES, 20 (2), pp. 159-166

IEA Bioenergy, 2020. Advanced Biofuels- Potential for Cost Reduction [verkkojulkaisu]. Saatavissa: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41_CostReductionBiofuels-11_02_19-final.pdf

International Maritime Organization (IMO), 2009. Second IMO GHG Study 2009 [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/SecondIMOGHGStudy2009.pdf>

International Maritime Organization (IMO), 2015. Third IMO Greenhouse Gas Study 2014 [verkkojulkaisu]. Saatavissa: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Docu>

[ments/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf](#)

International Maritime Organization (IMO), 2016. Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness and economic feasibility [verkkojulkaisu]. Saatavissa:

<http://www.imo.org/fr/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Report%20Methanol%2021.01.2016.pdf>

International Maritime Organization (IMO), 2018. Marine Environmental Protection Committee (MEPC), 73rd session, 22-26 October 2018 [IMO:n www-sivu]. [viitattu 1.4.2020]. Saatavissa:

<http://www.imo.org/en/MediaCentre/IMOMediaAccreditation/Pages/MEPC73preview.aspx>

International Maritime Organization (IMO), 2020. Greenhouse Gas Emissions [IMO:n www-sivut]. [viitattu 31.3.2020]. Saatavissa:

<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/GHG-Emissions.aspx>

Koroneos, C., Dompros, A., Roubas, G., Moussiopoulos, N., 2004. Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. International Journal of Hydrogen Energy, 29(14), pp. 1443-1450.

Library of Congress, 2020. BUCKAU [verkkokirjaston kuva]. Saatavissa: <https://www.loc.gov/pictures/item/2014717912/>

Mao, X., Rutherford, D., Osipova, L., Comer, B., 2020. Refueling assessment of a zero-emission container corridor between China and the United States: Could hydrogen replace fossil fuels?. Working paper 2020-05

McAllister, S., Chen, J., Fernandez-Pello, A.C., 2011. Fundamentals of combustion processes. Springer.

McGill, R., Remley, W., Winther, K., 2013. Alternative fuels for marine applications. A Report from the IEA Advanced Motor Fuels Implementing Agreement, 54.

Mediterranean Shipping Company (MSC), Worlds largest containership [verkköjulkaisu]. Saatavissa: <https://www.msc.com/getattachment/9b03c189-75b8-45b0-9970-0875ffbc3965/635622890129100000>

Methanex, 2014. Methanol Price [Methanex:in www-sivut]. [viitattu 31.3.2020]. Saatavissa: <http://173.254.67.121/products/methanolprice.html>

Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), 2020. Trend of the price of spot-LNG [verkköjulkaisu]. Saatavissa: https://www.meti.go.jp/english/statistics/sho/slng/result/pdf/202002_e.pdf

National Institute of Standards and Technology (NIST), 2018. NIST Chemistry WebBook, SRD 69, Saturation Properties for Hydrogen – Pressure Increments [NIST:n www-sivut]. [viitattu 4.4.2020]. Saatavissa: https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?Action=Load&ID=C1333740&Type=SatT&Digits=5&PLow=.5&PHigh=1.5&PInc=.1&RefState=DEF&TUnit=K&PUnit=atm&DUnit=kg/m3&HUnit=kJ/mol&WUnit=m/s&VisUnit=uPa*s&STUnit=N/m

Neste Oyj, 2012. NExBTL renewable diesel [tuoteopas]. Ladattavissa (.pdf): https://ir-service.appspot.com/view/ahBzfmlyLXNlcnZpY2UtaHJkchsLEg5GaWxlQXR0YWNoZWVudBiAgICh5Z2pCww?language_no=0

Neste Oyj, 2013. Neste Pro Diesel täyttää ensimmäisenä maailmassa autonvalmistajien suosittelman WWFC 5-luokituksen [lehdistötiedote]. Saatavissa: <https://www.neste.com/fi/neste-pro-diesel-t%C3%A4ytt%C3%A4%C3%A4->

[ensimm%C3%A4isen%C3%A4-maailmassa-autonvalmistajien-suositteleman-wwfc-5-luokituksen](#)

Neste, 2016. Neste Renewable Diesel Handbook [tuoteopas]. Saatavissa: https://www.neste.com/sites/neste.com/files/attachments/neste_renewable_diesel_handbook.pdf

Neste Oyj, 2020. Biodiesel prices (SME & FAME) [Neste Oyj:n www-sivut]. [viitattu 17.4.2020]. Saatavissa: <https://www.neste.com/corporate-info/investors/market-data/biodiesel-prices-sme-fame>

Norsepower, 2020. Technology [Norsepower:in www-sivut]. [viitattu 31.3.2020]. Saatavissa: <https://www.norsepower.com/technology>

Panasonic. Specifications for NCR18650BF [tuoteopas]. Saatavissa: https://b2b-api.panasonic.eu/file_stream/pids/fileversion/3446

Persson, M., Jönsson, O., Wellinger, A., 2006a. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection, IEA Bioenergy task 2006a, pp. 1-34.

Persson, M., Jönsson, O., Wellinger, A., 2006b. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection, IEA Bioenergy task 2006b, pp. 1-34.

Priyanto, E.M., 2017. A strategic development of alternative fuel initiation and its adaptation in a developing country: a feasibility study on methanol fuelled domestic passenger ships in Indonesia.

Renewable Energy Group, Inc. (REA), 2019. Renewable Fuels for the Diesel Market, 9th ISCC Global Sustainability Conference [verkkojulkaisu]. Saatavissa: https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2017/02/Fiedler_RED-II-Renewable-Fuels-for-the-Diesel-Market.pdf

Roskilly, A.P., Nanda, S.K., Wang, Y.D., Chirkowski, J., 2008. The performance and the gaseous emissions of two small marine craft diesel engines fuelled with biodiesel. *Applied Thermal Engineering*, 28(8-9), pp. 872-880.

Royal Caribbean International, 2020. 16 Night Galveston To Barcelona Cruise [Royal Caribbean:in www-sivut]. [viitattu 31.3.2020]. Saatavissa: <https://www.royalcaribbean.com/cruises/itinerary/16-night-galveston-to-barcelona-from-barcelona-on-jewel/JW16GAL-1573979211?sail-date=2021-03-22¤cy=USD&country=USA>

SkySails, 2020. SkySails Propulsion Systems [SkySails:in www-sivut]. [viitattu 17.4.2020]. Saatavissa: <https://skysails-marine.com/products.html>

Stojcevski, T., 2016. Methanol as engine fuel: Challenges and opportunities [verkkojulkaisu]. Saatavissa: http://www.greenpilot.marinemethanol.com/pages/news/160601/1-05_20160615_ToniStojcevskiW%C3%A4rtsil%C3%A4.pdf

Suomen Pankki, 2020. Valuuttakurssit [Suomen Pankin www-sivut]. [viitattu 9.4.2020 & 16.4.2020]. Saatavissa: <https://www.suomenpankki.fi/fi/Tilastot/valuuttakurssit/>

Suomen Standardoimisliitto SFS ry, 2001. SI-opas, Helsinki

Turner, J., Sverdrup, G., Mann, M.K., Maness, P., Kroposki, B., Ghirardi, M., Evans, R.J., Blake, D., 2008. Renewable hydrogen production. *International Journal of Energy Research*, 32(5), pp. 379-407.

U.S. Department of Energy (DOE), 2006. Hydrogen Program, Hydrogen Fuel Cells [verkkojulkaisu]. Saatavissa: https://www.californiahydrogen.org/wp-content/uploads/files/doe_fuelcell_factsheet.pdf

U.S. Energy Information Administration (EIA), 2020. Electric Power Monthly [EIA:n
www-sivu]. [viitattu 31.3.2020]. Saatavissa:
https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_5_6_a

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2015. Catalog of CHP Technologies,
Section 6. Technology Characterization – Fuel Cells [verkkojulkaisu]. Saatavissa:
https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/catalog_of_chp_technologies_section_6_technology_characterization_-_fuel_cells.pdf

U.S. Geological Survey (USGS), 2020. A Million Gallons of Water – How much is it?
[verkkojulkaisu]. Saatavissa: https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/a-million-gallons-water-how-much-it?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

Van Tassel, G.W., 2013. System and process for transporting LNG by non-self-propelled
marine LNG carrier.

Viking Line, 2020. Uusi roottoripurje teki Viking Gracesta edelläkävijän
[verkkojulkaisu]. [viitattu 31.3.2020]. Saatavissa: <https://www.vikingline.fi/valitse-matka/laivat/ms-viking-grace/roottoripurje/>

Wierzbicki, S., 2012. Biogas as a fuel for diesel engines. Journal of KONESs, 19, pp.
477-482.

World Nuclear Association, 2020. Nuclear-Powered Ships [World Nuclear
Accosiation:in www-sivu]. [viitattu 31.3.2020]. Saatavissa: <https://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx>

Wärtsilä, 2009. Wärtsilä powers Royal Caribbean's Oasis of the Seas – the largest and
most revolutionary cruise ship in the world [verkkojulkaisu]. [viitattu 31.3.2020].

Saatavissa: <https://www.wartsila.com/media/news/28-10-2009-wartsila-powers-royal-caribbean's-oasis-of-the-seas-the-largest-and-most-revolutionary-cruise-ship-in-the-world>

Wärtsilä, 2019. Wärtsilä 46DF product guide [tuoteopas]. Saatavissa: https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w46df.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dfengines&utm_term=w46df&utm_content=productguide&utm_campaign=msleadscoring

Wärtsilä, 2020. Viking Lady [verkköjulkaisu]. [viitattu 1.4.2020]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/marine/customer-segments/references/offshore/view/viking-lady>